

**Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Kombination von  
mathematischer Anordnungsoptimierung und  
Materialflusssimulation für die Produktionslayoutplanung**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

**Dipl.-Wirtschaftsing. Thomas Krüger**

aus Goslar

genehmigt von der Fakultät für

Mathematik / Informatik und Maschinenbau

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:

28.08.2019

Dekan:

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing Uwe Bracht

Gutachterin:

JProf. Dr. rer. nat. Anja Fischer

## **Vorwort des Herausgebers**

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teilebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität - der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.



## **Vorwort des Verfassers**

Die Planung von Produktionslayouts ist aufgrund der dynamischen Zusammenhänge in den Produktionsabläufen durch eine hohe Komplexität geprägt. Zur Bewältigung dieser Planungsaufgabe werden verschiedene Methoden aus dem Bereich der mathematischen Anordnungsoptimierung sowie der Digitalen Fabrik (meist als Einzellösung) eingesetzt.

In der vorliegenden Arbeit, wird eine Gesamtmethodik entwickelt, welche die Kombination und Integration von mathematischer Anordnungsoptimierung mit den Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik im Planungsprozess ermöglicht. Das Ziel ist es, mit der Gesamtmethodik eine Basis zu schaffen, um den steigenden Anforderungen bei der Planung gerecht zu werden.

Herrn Professor Uwe Bracht danke ich für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, den zahlreichen und zielführenden fachlichen Diskussionen sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit. Weiterhin möchte ich Professor Anja Fischer für die Übernahme des Zweitgutachtens und der angenehmen Kooperation im SWZ-Projekt danken sowie Herrn Professor Volker Wesling für die Leitung der Prüfungskommission.

Meinem Kollegen Dr.-Ing. Simon Schäfer danke ich herzlich für die gegenseitige Unterstützung und das gemeinsame Durchhalten im Endspurt für die Abgabe unserer Dissertationen, für die produktiven Wochenenden in der Universitätsbibliothek Braunschweig sowie für die effizienten aber stets sehr humorvollen Arbeitstage im Institut. Zudem möchte ich Marco Seewaldt für die Fachdiskussionen danken sowie meinem ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Wilko Hinrichs-Stark für die Ermutigung zu meinem Promotionsvorhaben.

Besonderer Dank gilt außerdem meinen Hiwis Robert Gottkowski, Fabian Staudinger, Philipp Geiersbach, Tobias Ferstl und Matthias Bugiel. Euer bemerkenswertes Engagement und die teilweise gemeinsamen Nachtschichten werde ich nicht vergessen.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, die mich stets gefördert, unterstützt und ermutigt haben sowie meiner Frau Franziska, die während meiner Promotionszeit oft auf mich verzichten musste.

Clausthal, im September 2019

Thomas Krüger



## **Abstract**

Steigende Kundenanforderungen, sinkende Produkt-, Innovations- und Technologielebenszyklen sowie der globale Wettbewerb führen ständig zu neuen Herausforderungen für die betriebliche Wertschöpfung. Eine wesentliche Grundlage zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen bildet die Effizienz der zugrundeliegenden Prozesse und Produktionsstrukturen. Bereits mit der Planung eines Produktionslayouts wird daher ein wichtiger Erfolgsfaktor geschaffen.

Aufgrund des turbulenten Umfelds und der dynamischen Zusammenhänge ist diese Planungsaufgabe durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet und muss gleichzeitig immer häufiger und unter hohem Zeitdruck gelöst werden. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Planung von Produktionslayouts unter Berücksichtigung der beschriebenen Anforderungen.

Zunächst werden die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen dargestellt und wichtige Elemente bzw. Teilmethoden für die Produktionslayoutplanung identifiziert. Darauf aufbauend wird der Fokus dieser Arbeit auf die Verfahren der mathematischen Anordnungsoptimierung und die Materialflusssimulation im Rahmen der Digitalen Fabrik gelegt.

Vorhandene Planungsmethoden aus Wissenschaft und Praxis, die diese Elemente aufgreifen, werden den aktuellen Anforderungen jedoch nicht oder nur teilweise gerecht. Aus diesem Grund gilt es, eine Gesamtmethodik zur Planung von Produktionslayouts zu entwickeln, die eine Verringerung der Planungszeit, eine Verbesserung der Planungsqualität sowie eine dynamische Absicherung der Ergebnisse bei der Bearbeitung von komplexen Planungsproblemen ermöglicht.

Um die beschriebenen Herausforderungen bei der Produktionslayoutplanung zu berücksichtigen, werden in der Gesamtmethodik neben der mathematischen Anordnungsoptimierung und der Materialflusssimulation zur dynamischen Absicherung der Ergebnisse auch partizipative Planungswerkzeuge und Virtual Reality eingebunden, um die Planungsqualität weiter zu steigern. Im Gegensatz zu den untersuchten Planungsmethoden werden in der Gesamtmethodik exakte mathematische Anordnungsverfahren eingesetzt, die eine hohe Ergebnisqualität sicherstellen. Die Anordnungsoptimierung stellt die Basis für die nachgelagerten

Planungsschritte dar. Mit der Materialflusssimulation wird die Planung dynamisch abgesichert, wodurch die Planungsqualität weiter steigt. Bislang wurde der Einsatz der Materialflusssimulation zur Unterstützung der Produktionslayoutplanung trotz der umfangreichen Möglichkeiten zur Absicherung und Optimierung der Planung durch den hohen Modellierungsaufwand stark gehemmt. Bei der Konzeption und Umsetzung der Gesamtmethodik bildet daher die automatisierte Simulationsmodellgenerierung in Verbindung mit der mathematischen Anordnungsoptimierung einen Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit, um diese Hemmnisse während der Planung zu eliminieren.

Mit der entwickelten Gesamtmethodik ist es möglich, eine mathematische Anordnungsoptimierung direkt im Simulator durchzuführen oder die Ergebnisse aus externen Solvern zu importieren und daraus ebenfalls automatisiert lauffähige Simulationsmodelle zu generieren. Zusätzlich wurden in die Gesamtmethodik weitere Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik eingebunden, um den Planungsprozess weiter zu verbessern. Im Rahmen der partizipativen Layoutplanung, bei der die betroffenen Mitarbeiter ihr Fachwissen einbringen, wird der Planungstisch in den Planungsprozess integriert und durchgängig mit der Materialflusssimulation verbunden, um neue Planungsergebnisse weiterhin dynamisch abzusichern. Im abschließenden Freigabeprozess wird Virtual Reality zur Visualisierung des Layouts und der Abstimmung der Planungsergebnisse (z.B. mit Betriebsräten und Entscheidungsträgern) eingesetzt, wobei ebenfalls eine durchgängige Kopplung mit der Materialflusssimulation gegeben ist. Die Gesamtmethodik wird bei einer Neuplanung vollständig durchlaufen. Bei der Umplanung während der Betriebsphase kann der Planungsprozess zielgerichtet verkürzt werden, um eine schnelle und effiziente Anpassung an neue Rahmenbedingungen zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wird die Gesamtmethodik sowohl für die Neuplanung als auch für die Umplanung während der Betriebsphase jeweils anhand eines Praxisbeispiels eingesetzt und deren Anwendung dargestellt. In einer kritischen Reflexion wird der Mehrwert für den praktischen Einsatz analysiert und ein Ausblick zu weiteren Entwicklungsmöglichkeiten gegeben. Mit der entwickelten Gesamtmethodik lassen sich qualitativ hochwertige, dynamisch abgesicherte Produktionslayouts in kürzerer Zeit mit verringerten Aufwand planen.



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellungen für die Layoutplanung .....	1
1.2 Kernfragen der Forschungsarbeit .....	3
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise .....	3
<b>2 Wissenschaftliche Grundlagen.....</b>	<b>6</b>
2.1 Fabrikplanung mit der Kernaufgabe Layoutgestaltung .....	6
2.1.1 Veränderungsfähigkeit von Fabriken .....	7
2.1.2 Ablauf von Fabrikplanungsprojekten .....	15
2.1.3 Layoutplanung .....	17
2.1.3.1 Ziele der Layoutplanung .....	17
2.1.3.2 Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess .....	18
2.1.3.3 Partizipative Layoutplanung .....	21
2.2 Anordnungsverfahren in der Layoutplanung .....	22
2.2.1 Graphische Verfahren .....	23
2.2.2 Mathematische Anordnungsverfahren .....	24
2.2.2.1 Heuristische Anordnungsverfahren .....	25
2.2.2.2 Analytische Anordnungsverfahren .....	28
2.3 Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik .....	34
2.3.1 Virtual Reality .....	36
2.3.2 Digitale, partizipative Layoutplanung .....	37
2.3.3 Simulationsmethoden in der Digitalen Fabrik .....	39
2.4 Materialflusssimulation .....	41
2.4.1 Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien .....	44
2.4.2 Visualisierung und Animation in der Simulation .....	49
2.4.3 Einsatz von Materialflusssimulationen in der Fabrikplanung .....	51
<b>3 Stand der Forschung und Praxis .....</b>	<b>57</b>
3.1 Stand der Forschung und Praxis zum kombinierten Einsatz von Simulation mit Verfahren der Anordnungsoptimierung .....	57
3.1.1 Simulation zur Unterstützung der Layoutplanung und Anordnungsoptimierung .....	57
3.1.1.1 Anwendungsfälle Ansatz 1 – Anordnung planen/optimieren und anschließend simulieren .....	58
3.1.1.2 Anwendungsfälle Ansatz 2 – Simulation durchführen und anschließend die Anordnung erstellen/optimieren .....	65
3.1.2 Weitere simulationsgestützte Planungsmethoden .....	67
3.1.3 Zwischenfazit .....	68

---

3.2	Ableitung des Untersuchungsbedarfes .....	68
3.2.1	Ableitung von Kriterien und Fragestellungen für die Analyse .....	69
3.2.2	Analyse und Bewertung der bestehenden Methoden .....	73
3.2.3	Zusammenfassung des Forschungsbedarfes .....	75
3.2.4	Definition des Forschungsziels.....	76
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer kombinierten Gesamtmethodik.....</b>	<b>79</b>
4.1	Abgeleitete Anforderungen und Ziele .....	79
4.1.1	Einbindung der mathematischen Anordnungsoptimierung .....	82
4.1.2	Simulationsrelevante Zielsetzungen .....	83
4.1.3	Unterstützende Planungsmethoden und -werkzeuge.....	84
4.2	Vorgehensweise zur Umsetzung .....	85
4.3	Einbindung der Anordnungsverfahren in die Simulation.....	87
4.3.1	Weiterentwicklung eines heuristischen Anordnungsverfahrens ...	87
4.3.2	Kombination des DRFLP mit der Simulation .....	89
4.4	Bestimmung der erforderlichen Basisdaten und Funktionen .....	90
4.4.1	Basisdaten für die Planung und Simulation.....	91
4.4.2	Festlegung der erforderlichen Simulationsfunktionen .....	92
4.4.2.1	Funktionen zur Steuerung der Abläufe .....	94
4.4.2.2	Analysefunktionen .....	95
4.4.2.3	Automatisierte Modellgenerierung .....	96
4.4.2.4	Anforderungskatalog für die Modellbildung .....	97
4.4.2.5	Auswahl der Simulationssoftware.....	99
4.5	Entwicklung eines Simulationsbasismodells.....	100
4.5.1	Festlegung der Systemgrenzen und Teilsysteme des Modells ....	100
4.5.2	Modellformalisierung .....	103
4.5.2.1	Formalisierung der Teilsysteme nach Kernaufgaben.....	103
4.5.2.2	Formalisierung des Transportsystems.....	106
4.5.2.3	Formalisierung des Basismodells zur automatisierten Generierung layoutspezifischer Simulationsmodelle.....	108
4.5.3	Implementierung in Plant Simulation.....	113
4.5.4	Verifikation und Validierung.....	120
4.5.5	Einbindung von digitalen, partizipativen Werkzeugen .....	126
4.5.6	Einbindung von Virtual Reality .....	132
4.6	Die Gesamtmethodik TOMAS .....	135
4.7	Organisatorische Rahmendbedingungen für den Einsatz von TOMAS..	142
<b>5</b>	<b>Praktische Anwendung der Gesamtmethodik.....</b>	<b>144</b>
5.1	Vergleich der Anordnungsverfahren .....	144
5.1.1	Einführung in das Planungsbeispiel – Neuplanung und Vergleich der Anordnungsverfahren .....	145

---

5.1.2 Vergleich der Verfahren zur Anordnungsoptimierung.....	150
5.2 Einsatz von TOMAS für eine Neuplanung .....	154
5.2.1 Anwendung der Gesamtmethodik in der Neuplanung .....	154
5.3 Einsatz von TOMAS für die Planung während der Betriebsphase .....	165
5.3.1 Einführung in das Planungsbeispiel .....	165
5.3.2 Anwendung von TOMAS für die Umplanung während des Betriebes .....	168
<b>6 Kritische Reflexion und Ausblick .....</b>	<b>178</b>
6.1 Mathematische Anordnungsoptimierung .....	178
6.2 Simulation und Partizipation .....	179
6.3 Abschließende Betrachtung.....	181
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>184</b>
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>186</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau und Zielsetzungen der Arbeit .....	4
Abbildung 2: Wandlungsbefähiger einer Fabrik (Wiendahl et al. 2014, S. 133) .	10
Abbildung 3: Gestaltungsfelder der Veränderungsfähigkeit (Darstellung in Anlehnung an Wiendahl et al. 2014, S. 134).....	11
Abbildung 4: Mobilität und Modularität technischer Ressourcen (KUKA Systems GmbH 2018).....	12
Abbildung 5: Mobile Arbeitsplätze und Produktionsmodule – Bildquelle: (SmartFactory KL 2019).....	13
Abbildung 6: Steigerung der Mobilität von Maschinen durch Container – Bildquelle: (Clegg Industries 2019) .....	13
Abbildung 7: Wandlungsbefähiger von Maschinen und Gebäuden – Bildquelle: (Startup Factory 2019).....	14
Abbildung 8: Phasen des Fabrikplanungsprozesses in Anlehnung an (Kettner et al. 2010, S. 5; Wiendahl et al. 2010, S. 429; VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 8).....	15
Abbildung 9: Einordnung der Layoutplanung in die Fabrikplanungsphasen nach VDI 5200 .....	18
Abbildung 10: Ablauf der smarten digitalen Layoutplanung (Brosch 2014, S. 81) .....	20
Abbildung 11: Klassifizierung der Anordnungsverfahren zur optimierten Zuordnung von Betriebseinheiten in Anlehnung an (Kettner et al. 2010, S. 228; Arnold et al. 2008, S. 319; Bogatzki 1998, S. 19–21).....	22
Abbildung 12: Sankey-Diagramm und Kreisverfahren (Pawellek 2014, S. 202) 23	
Abbildung 13: Anordnungsplanung mittels Dreieckverfahren .....	26
Abbildung 14: Von der Anordnungsoptimierung zum Blocklayout.....	27
Abbildung 15: Anordnungsprinzip und Wegestrukturen des SRFLP, DRFLP und MRFLP .....	29
Abbildung 16: Transportrichtungen und Bedienpunkte im DRFLP-Modell .....	33
Abbildung 17: Planungstisch – Umsetzungsvarianten in Anlehnung an (Brosch 2014, S. 29; ASSTEC Assembly Technology GmbH & Co. KG 2018).....	37
Abbildung 18: Einteilung der Simulationsmethoden nach ihrer zeitlichen Repräsentation (Bracht et al. 2018b, S. 117–132).....	40
Abbildung 19: Zeitverhalten der Simulationsmethoden in Anlehnung an (Law und Kelton 1991, S. 111; Cassandras und Lafortune 2008, S. 31; Feldmann und Reinhart 2000, S. 19).....	41

---

Abbildung 20: Einordnung von Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen während der Simulationszeit in Anlehnung an (Bracht et al. 2018b, S. 129; Eley 2012, S. 8; Mattern und Mehl 1989, S. 201) .....	42
Abbildung 21: Vorgehensmodell einer Simulationsstudie in Anlehnung an (Rabe et al. 2008, S. 5; VDI-Richtlinie 3633, S. 19) .....	45
Abbildung 22: 2D-Darstellung eines Simulationsmodells in Plant Simulation ...	50
Abbildung 23: 3D-Visualisierung eines Simulationsmodells zur Layoutanalyse in Plant Simulation .....	50
Abbildung 24: Simulationseinsatz in den Fabrikplanungsphasen in Anlehnung an (Grundig 2015, S. 240) .....	52
Abbildung 25: Partizipative und simulationsgestützte Layoutplanung (Schenk et al. 2014, S. 242) .....	61
Abbildung 26: Integration von Planungsschritten in der Produktionssystemplanung (Förster et al. 2001, S. 224; Schenk et al. 2014, S. 232) .....	63
Abbildung 27: 5D-Simulation eines Layouts (Shariatzadeh et al. 2012, S. 303) .....	67
Abbildung 28: Bewertung der Methoden zum kombinierten Einsatz von Simulation und Layoutplanung anhand der aufgestellten Kriterien .....	73
Abbildung 29: Rahmenbedingungen, Defizite und Anforderungen an eine neue Gesamtmethodik .....	80
Abbildung 30: Ziele bei der Entwicklung der Gesamtmethodik .....	81
Abbildung 31: Phasen und Inhalte zur Entwicklung der Gesamtmethodik .....	86
Abbildung 32: Ablauf der Heuristik zur Erzeugung transportoptimierter Startlösungen .....	88
Abbildung 33: Darstellung einer optimalen DRFLP-Anordnungslösung für den Datenaustausch mit dem Simulator .....	90
Abbildung 34: Klassifizierung der erforderlichen Basisdaten für die kombinierte Gesamtmethodik .....	91
Abbildung 35: Klassifizierung der identifizierten Grundfunktionen .....	93
Abbildung 36: Standardelemente und Bausteine von Plant Simulation .....	99
Abbildung 37: Systemgrenzen, zu modellierende Teilsysteme und zu verarbeitende Daten .....	101
Abbildung 38: Formales Modell eines Montagesystems .....	104
Abbildung 39: Formales Modell eines Bearbeitungssystems .....	105
Abbildung 40: Formales Modell eines Demontagesystems .....	106
Abbildung 41: Formales Modell des Transportsystems .....	107

Abbildung 42: Strukturierungskonzept der Oberfläche des Basismodells.....	110
Abbildung 43: Vorformatierte Beispieltabellen für Import und Steuerungen ....	111
Abbildung 44: Ablauf der entwickelten und implementierten Modellgenerierung .....	115
Abbildung 45: Aufbau des Dialogfensters zum Datenimport .....	116
Abbildung 46: Aufbau des Dialogfenster zur Modellgenerierung .....	116
Abbildung 47: Aufbau des Dialogfensters zur Modellsteuerung .....	118
Abbildung 48: Implementiertes Simulationsmodell nach dem automatisierten Modellaufbau.....	119
Abbildung 49: Beispiel des Programmcodes für die Verifizierung und Validierung .....	123
Abbildung 50: Schrittweise Nachverfolgung der Daten und des Programmcodes während der Verifikation und Validierung.....	124
Abbildung 51: Verifikation und Validierung mittels Animation am Beispiel der Zielsteuerung .....	125
Abbildung 52: Marker zur Interaktion mit 3D-Objekten in Plant Simulation über das edddison Plug-in (edddison 2017) .....	127
Abbildung 53: Partizipative Planung in Plant Simulation mit dem HP Sprout (edddison 2017) .....	128
Abbildung 54: Prototypische Umsetzung des Plant Simulation basierten Planungstisches im IMAB.....	130
Abbildung 55: Kamerabasierte Erfassung der Positionen von Markern mit Maschinengrundrissen .....	131
Abbildung 56: Planungsansicht auf dem Tablet .....	133
Abbildung 57: Tablet-basierte Interaktion mit Plant Simulation im VR-Labor des IMAB.....	134
Abbildung 58: Ablauf der entwickelten Gesamtmethodik .....	136
Abbildung 59: Gesamtmethodik - Verkürzter Planungsprozess für die Umplanung .....	141
Abbildung 60: Übersicht der Teile in Eigenfertigung, der Zukaufteile und des Endprodukts [Quelle der Einzelbilder: (Prêt 2017)] .....	145
Abbildung 61: Maschinenpark zur Produktion der Getriebe .....	148
Abbildung 62: Optimierte Anordnung der Maschinen durch die drei Anordnungsverfahren .....	151
Abbildung 63: Mathematisch optimierte Anordnung für das Praxisbeispiel (mit Vorgabe der Warenein- und -ausgänge) .....	155

---

Abbildung 64: Detaillierte Darstellung der optimierten Anordnung .....	155
Abbildung 65: Übertragung der Daten in das Basis-Simulationsmodell .....	157
Abbildung 66: Spezifisches Simulationsmodell der mathematisch optimierten Anordnung .....	157
Abbildung 67: Maschinenauslastung bei Simulation der mathematisch optimierten Anordnung .....	159
Abbildung 68: Ressourcenstatistik der Transportmittel .....	160
Abbildung 69: Marker- und Tablet-basierte Interaktionsmöglichkeiten mit dem Modell.....	161
Abbildung 70: Darstellung des geplanten Layouts .....	162
Abbildung 71: Präsentation der Planungsergebnisse im VR-Labor .....	164
Abbildung 72: Produkte der verschiedenen Aufträge .....	165
Abbildung 73: Arbeitsplätze zur Produktion der elektrischen Antriebe .....	166
Abbildung 74: Module zur Produktion der elektrischen Antriebe .....	167
Abbildung 75: Layout - PP Gesamt.....	170
Abbildung 76: Optimierte Layout für die Bearbeitung von Auftrag 1 .....	171
Abbildung 77: Optimierte Layout für die Bearbeitung von Auftrag 2 .....	171
Abbildung 78: Optimierte Layout für die Bearbeitung von Auftrag 3 .....	172
Abbildung 79: Diagramm der durchschnittlichen Durchlaufzeiten eines – Auftrag 1 .....	173
Abbildung 80: Diagramm der durchschnittlichen Durchlaufzeiten eines Loses – Auftrag 2.....	174
Abbildung 81: Gegenüberstellung der Bearbeitungszeit bei Anpassung der Layouts und ohne Anpassung.....	175
Abbildung 82: Qualitative Darstellung der Verringerung des Zeit- und Personalaufwands bei der Planung mit TOMAS.....	176

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationseinsatz in verschiedenen Planungsebenen (Feldmann und Reinhart 2000, S. 15).....	55
Tabelle 2: Gemeinsame Basisdaten für Simulation und Layoutplanung .....	92
Tabelle 3: Übersicht der Steuerungsfunktionen .....	94
Tabelle 4: Anforderungskatalog für die Modellbildung und Implementierung im Rahmen der Gesamtmethodik .....	98
Tabelle 5: Eingesetzte Verifizierungs- und Validierungstechniken .....	120
Tabelle 6: Losgrößen der zu produzierenden Einzelteile .....	149
Tabelle 7: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 1 (Dreieckverfahren).....	152
Tabelle 8: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 2 (weiterentwickelte Heuristik) .....	153
Tabelle 9: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 3 (DRFLP) .....	153
Tabelle 10: Maschinenpositionen der optimierten Anordnung .....	156
Tabelle 11: Simulationsergebnisse der mathematisch optimierten Anordnung..	158
Tabelle 12: Simulationsergebnisse des geplanten Layouts.....	163
Tabelle 13: Transportmatrix für das Gesamte Produktionsprogramm .....	168
Tabelle 14: Transportmatrix - Auftrag 1 .....	169
Tabelle 15: Transportmatrix - Auftrag 2 .....	169
Tabelle 16: Transportmatrix - Auftrag 3 .....	170
Tabelle 17: Gesamtbearbeitungszeiten Auftrag 1 .....	173
Tabelle 18: Gesamtbearbeitungszeiten Auftrag 2 .....	173
Tabelle 19: Übersicht der Simulationsergebnisse für die Aufträge und Layouts	175

# 1 Einführung

Der globale Wettbewerb, die zunehmende Individualisierung der Kundenanforderungen und immer kürzere Produkt-, Innovations- und Technologielebenszyklen erzeugen ein dynamisches Wettbewerbsumfeld (Bracht et al. 2017, S. 200). Zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit sind die Unternehmen aufgefordert, auch die Fabrikplanung als kontinuierlichen Prozess und stetige Aufgabe anzusehen (Schuh 2014, S. 191). Aufgrund der turbulenten externen Einflüsse sind zukünftige Entwicklungen der Produktionssituation nicht genau zu prognostizieren. Es liegen häufig unscharfe Planungsdaten vor, wodurch die Forderung nach steigender Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Fabriken verstärkt wird (Wiendahl et al. 2014, S. 14–15; Hawer et al. 2015, S. 348; Kerkenberg 2016, S. 104).

Um eine schnelle Anpassung der Produktionsstrukturen auf sich ständig ändernde Bedingungen zu ermöglichen, wurden modulare Produktionsbausteine nach dem Plug and Produce Prinzip entwickelt (Hildebrand 2005, S. 52). Diese Ansätze gewinnen in Verbindung mit Themen, wie Industrie 4.0 und der damit verbundenen Digitalisierung und Vernetzung, immer mehr an Bedeutung. Im Rahmen einer kontinuierlichen Planung gilt es, Produktionslayouts mit zunehmend modularen und mobilen Betriebsmitteln während der Betriebsphase auf die aktuellen Gegebenheiten anzupassen. Eine Basis, um diesen steigenden Anforderungen während der Planung und des Betriebes gerecht zu werden, bildet die Digitale Fabrik (Bracht et al. 2018b, S. 52–53). Die Vorgehensweise, wie Produktionslayouts unter Berücksichtigung der genannten Einflüsse zu planen sind, wird in der vorliegenden Arbeit behandelt.

## 1.1 Problemstellungen für die Layoutplanung

Die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen ist abhängig von der Effizienz der zugrundeliegenden Prozesse. Diese werden stark von der Gestaltung der Fabrikstrukturen und der Produktionslayouts beeinflusst. Die Planung, Auswahl und Umsetzung von materialflussoptimierten Maschinenanordnungen ermöglicht es, hohe Kostenvorteile zu erzielen und trägt daher wesentlich zum Erfolg der Unternehmen bei (Bracht et al. 2017, S. 200; Hawer et al. 2015, S. 348).

Aktuelle Fabriken müssen immer komplexere Ansprüche erfüllen, wobei die zur Verfügung stehenden Planungszeiten zur Auslegung optimaler Produktionssysteme kontinuierlich sinken. In den Planungsprozess sind daher

zahlreiche Planungsteilnehmer aus unterschiedlichen Fachbereichen in den Prozess zu integrieren (Kerkenberg 2016, S. 104).

Die Planung und Analyse von komplexen und dynamischen Produktionssystemen lässt sich in der Regel nicht mehr allein mit statischen Fabrikplanungsmethoden bewältigen (Bracht et al. 1992, 6). Diese berücksichtigen die im System auftretenden Wechselwirkungen nicht ausreichend, da sie die dynamischen Zusammenhänge stark vereinfachen oder vernachlässigen. Daher ist zusätzlich der Einsatz geeigneter Hilfsmittel erforderlich um den Planungsprozess zu unterstützen (Bracht et al. 1992, 6). Deshalb ist die konsequente Nutzung von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik, die insbesondere für dynamische Betrachtungen geeignet sind, unumgänglich. Die Materialflusssimulation erfüllt die Anforderungen nach einer dynamischen Betrachtung der Wirkungszusammenhänge und stellt in Kombination mit weiteren geeigneten Methoden und Werkzeugen der Layoutplanung ein geeignetes Instrument zur effizienten Lösung von Planungsproblemen dar. Allerdings ist die Erstellung von Simulationsmodellen mit hohem Aufwand verbunden, was insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen ein großes Hindernis darstellt (Wesebaum und Mach 2016, S. 100).

Daraus ergibt sich für die Layoutplanung folgende Problemstellung: Steigende Komplexität und dynamische Zusammenhänge sind im Planungsprozess zu berücksichtigen. Dieser muss wiederum aufgrund sinkender Produktlebenszyklen und einem turbulenten Wettbewerbsumfeld immer häufiger oder sogar kontinuierlich und mit verschiedenen Planungsbeteiligten durchlaufen werden.

*„Im Zuge des Übergangs zur Industrie 4.0 steht die Fabrikplanung vor der Herausforderung, neue Kriterien und Methoden zu entwickeln, nach denen eine Feinanordnung der Maschinen und Arbeitsplätze geplant wird.“ (Dombrowski et al. 2017, S. 183)*

Der Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik in Kombination mit mathematischen Verfahren zur Anordnungsoptimierung von Maschinen bietet ein hohes Potential zur Unterstützung der Planungsphase. Dies erschließt sich aus dem Synergieeffekt bei der Verbindung beider Teilbereiche, wodurch beispielsweise eine Reduktion der Planungszeit und eine Verbesserung der Planungsergebnisse erreicht werden soll. Diese Absicht wird in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet und bei der Entwicklung einer neuen Gesamtmethodik für die Planung von Produktionslayouts aufgegriffen.

## 1.2 Kernfragen der Forschungsarbeit

Aus den genannten Rahmenbedingungen und den aktuellen Herausforderungen für die Layoutplanung ergeben sich für diese Arbeit eine übergeordnete Zielsetzung sowie weitere Forschungsfragen, die sich auf zu erreichende Teilziele beziehen. Die grundlegenden Fragestellungen dieser Arbeit lassen sich folgendermaßen formulieren:

*Wie können (nachweislich) sehr gute Produktionslayouts mit einfachen Wegestrukturen innerhalb kurzer Zeit geplant, dynamisch abgesichert und mit den Planungsbeteiligten abgestimmt werden? Wie müssen dabei die Planungsmethoden und Werkzeuge gestaltet werden, um den Planer effizient zu unterstützen?*

Die übergeordnete Zielsetzung ist daher die Entwicklung einer Gesamtmethodik, welche die mathematische Anordnungsoptimierung und die Materialflusssimulation für die Planung von Produktionslayouts kombiniert und dabei auftretende Synergieeffekte nutzt. Diese Gesamtmethodik soll eine Lösung der eingangs beschriebenen Problemstellungen bieten, die Planung von Maschinenanordnungen unter dynamischen Einflüssen ermöglichen und den immer kürzer werdenden Planungszeiträumen Rechnung tragen. Die Materialflusssimulation ist als ein grundlegender Bestandteil einzubinden. Der Betrachtungsrahmen wird dabei auf Layouts mit einfachen Wegestrukturen begrenzt, um das grundsätzliche Potential der zu entwickelnden Methodik einordnen zu können.

## 1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Zu Beginn dieser Arbeit werden das Handlungsfeld und die Problemstellung im Kontext des Gesamtziels der Untersuchungen und Entwicklungen beschrieben und wesentliche Fragestellungen, die es im weiteren Verlauf zu beantworten gilt, definiert. Die Arbeit ist in sieben Kapitel untergliedert, denen jeweils eine konkrete Zielsetzung zugrunde liegt. Der Aufbau und die Zielsetzungen dieser Arbeit werden in **Abbildung 1** schematisch dargestellt und die Kapitel den drei Hauptphasen Grundlagenermittlung, Methodenentwicklung und praktische Anwendung zugeordnet.



	<u>Gliederung</u>	<u>Inhalt</u>	
<u>Kapitel 1</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung</li> <li>• Definition der Handlungsfelder und Zielsetzungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufzeigen des Untersuchungs- und Entwicklungsbedarfes</li> <li>• Beschreibung des Einsatzpotentials für die Fabrikplanung</li> </ul>	
<u>Kapitel 2</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung von grundlegenden Begriffen und Definitionen</li> <li>• Darstellung der relevanten wissenschaftlichen Grundlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenfassung der erforderlichen Grundlagen</li> <li>• Einordnung der verwendeten Verfahren, Methoden und Werkzeuge</li> </ul>	Grundlagen
<u>Kapitel 3</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung und Zusammenfassung des Entwicklungsstands in Forschung und Praxis</li> <li>• Ableitung der Defizite und Formulierung der bestehenden Lücke in Wissenschaft und Praxis</li> </ul>	Forschungsbedarf
<u>Kapitel 4</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableitung von Anforderungen</li> <li>• Kombination und Kopplung von Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation (Konzeptentwicklung, Formalisierung und Implementierung)</li> <li>• Entwicklung der Gesamtmethodik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschreibung der Anforderungen und der verwendeten wissenschaftlichen Methoden</li> <li>• Entwicklung eines Simulationskonzeptes zur Kombination von Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation</li> <li>• Entwicklung einer kombinierten Planungsmethodik aus mathematischer Anordnungsoptimierung, Simulation, partizipativer Planung und VR</li> </ul>	Entwicklung der Gesamtmethodik
<u>Kapitel 5</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praktische Anwendung der entwickelten Gesamtmethodik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Darstellung der Anwendungsbeispiele</li> <li>• Anwendung der Gesamtmethodik für:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– eine Neuplanung</li> <li>– eine Umplanung während des Betriebes</li> </ul> </li> </ul>	Anwendung
<u>Kapitel 6</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kritische Reflexion und Ausblick</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der entwickelten Gesamtmethodik</li> <li>• Darstellung weiterer Entwicklungsperspektiven</li> </ul>	
<u>Kapitel 7</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenfassung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenfassung des Inhalts der vorliegenden Arbeit</li> </ul>	

Abbildung 1: Aufbau und Zielsetzungen der Arbeit

Aufbauend auf den in diesem Kapitel gestellten Forschungsfragen werden in Kapitel 2 die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen beleuchtet und zusammengefasst. Des Weiteren erfolgt in Kapitel 3 eine Untersuchung zum Stand der Forschung und dem praktischen Einsatz von Simulation und Anordnungsverfahren im Rahmen der Layoutplanung. Basierend auf diesen Ergebnissen findet eine Darstellung der Defizite und des Forschungsbedarfes statt.

Aus dem Forschungsbedarf werden zu Beginn des vierten Kapitels zunächst Anforderungen für die Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung und Simulation für die Produktionslayoutplanung abgeleitet. Anschließend wird eine Methode zur Verknüpfung der Anordnungsverfahren mit der Simulation entwickelt und umgesetzt. Nach der Formulierung eines Konzeptmodells für die Simulation folgt die weitere Modellformalisierung und schließlich die Implementierung in einem Simulator. Darauf aufbauend werden partizipative Planungswerkzeuge und Virtual Reality in die Gesamtmethodik integriert. Anschließend wird die entwickelte Methodik vorgestellt.

In Kapitel 5 wird die entwickelte Gesamtmethodik für eine Neuplanung und eine Umplanung während der Betriebsphase angewendet. Anhand der Anwendungsbeispiele wird ihre Eignung hinsichtlich der ermittelten Anforderungen und Zielsetzungen überprüft und in Kapitel 6 kritisch reflektiert. Zudem wird ein Ausblick zum weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Abschließend erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit.

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Begriffe und deren inhaltliche Zusammenhänge dargestellt. Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Fabrikplanungsprozesses, um die Layoutplanung, die Verfahren zur Anordnungsoptimierung und Methoden der Digitalen Fabrik, in den Kontext der Fabrikplanung einordnen zu können. Diese bilden einen Schwerpunkt für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit. Aufbauend auf den wissenschaftlichen Grundlagen wird in Kapitel 3 der aktuelle Stand der Technik analysiert und bewertet. Dabei werden die identifizierten Defizite und aktuellen Anforderungen aufgezeigt, die sich in den Forschungsfragen dieser Arbeit widerspiegeln.

### 2.1 Fabrikplanung mit der Kernaufgabe Layoutgestaltung

Die eingangs beschriebenen und stetig wechselnden Rahmenbedingungen führen zu neuen Herausforderungen für produzierende Unternehmen. Die Fabrikplanung ist ein wesentlicher Faktor zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit (Grundig 2015, S. 5), da sie die Grundlage für eine effiziente Produktion sichert. In der Richtlinie 5200 gibt der VDI für den Begriff der Fabrikplanung folgende Definition:

*„Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion.“* (VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 3)

Entgegen der eher prozessorientierten Betrachtung der Fabrikplanung aus der VDI Richtlinie 5200 formuliert Kettner eine aufgaben- und zielbezogene Definition:

*„Aufgabe der Fabrikplanung ist es, unter Berücksichtigung zahlreicher, spezifischer Randbedingungen die Voraussetzungen zur Erfüllung der betrieblichen Ziele sowie der sozialen und volkswirtschaftlichen Funktionen einer Fabrik zu schaffen. Das heißt, die Fabrikplanung muss einen technisch einwandfreien, wirtschaftlichen Ablauf des Produktionsprozesses bei guten Arbeitsbedingungen für die in der Fabrik tätigen Menschen ermöglichen.“* (Kettner et al. 2010, S. 3)

Aus den Definitionen gehen die Aufgaben und Umfänge der Fabrikplanung hervor. Allerdings lassen sie die Schlussfolgerung zu, dass es sich dabei um einen einmaligen Prozess handelt. Daher wird in der VDI Richtlinie 5200 ergänzt, dass Fabrikplanung auch die Anpassung im laufenden Betrieb umfassen kann (VDI-

Richtlinie 5200 2011, S. 3). Die Planung ist als kontinuierlicher Prozess und stetige Aufgabe zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit anzusehen (Schuh 2014, S. 191; Silcher et al. 2015, S. 96).

Bereits 1992 erfolgte von *Bracht et al.* eine Abgrenzung der statischen und dynamischen Fabrikplanung. Dabei kennzeichnet die statische Planung eine fixierte Betrachtung der Produktionssysteme. Um der steigenden Komplexität entgegen zu wirken und die Planungsqualität zu steigern, müssen Produktionssysteme und Anlagen dynamisch betrachtet und geplant werden. Dies kann vor allem durch den Einsatz von Simulationen ermöglicht werden (Bracht et al. 1992, S. 298). Weitere Autoren wie *Schenk et al.* und *Beller* differenzieren ebenfalls zwischen statischer und dynamischer Fabrikplanung und sehen deren gemeinsame Grundlage im Produktionsprogramm. Die statische Fabrikplanung schafft demnach grundlegende Strukturen und Ressourcen, welche von der dynamischen Fabrikplanung während des Fabrikbetriebes<sup>1</sup> genutzt werden. Die dynamische Fabrikplanung wird als permanent angesehen und dient der prozessorientierten Anpassung an aktuelle Gegebenheiten (Schenk et al. 2014, S. 30; Beller 2009, S. 70).

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit soll für die zu entwickelnde, kombinierte Gesamtmethodik folgende Definition der dynamischen Planung zugrunde liegen: *Im Rahmen der Layoutentwicklung wird die Anordnung von Arbeitsstationen, Maschinen, Anlagen oder Bereichen unter Betrachtung des (zeit-) dynamischen Systemverhaltens durchgeführt und durch Materialflusssimulationen abgesichert.* Diese Definition gilt sowohl für die erstmalige und grundlegende Planung eines Fabriksystems als auch die Projektierung während des Fabrikbetriebes (z.B. zur Anpassung an neue Rahmenbedingungen).

### 2.1.1 Veränderungsfähigkeit von Fabriken

Aufgrund unterschiedlicher Lebenszyklen von Fabriken, Produktionsanlagen und Produkten und der weiterhin steigenden Dynamik in der Veränderung von Produkten wird die Prognostizierbarkeit von Zukunftsszenarien massiv erschwert und somit die Voraussetzung für die langfristige Planung von Fabriken entzogen (Westkämper 2000, S. 94; Silcher et al. 2015, S. 96). Planungsaufgaben werden aufgrund der kürzer werdenden Produktlebenszyklen, dynamischer

---

<sup>1</sup> „Fabrikbetrieb mit den Aufgaben Betreiben, Lenken und Steuern der Abläufe (einschließlich Instandhaltung und Service) in der Fabrik muss die Zielvorgaben des Unternehmens durch eine sozial-ökonomische und ökologische (ressourcen-) effiziente Aufbau- und Ablauforganisation im partizipativ-transparenten Zusammenwirken der Komponenten Mensch, Technik und Organisation sowie Kooperation innerhalb und außerhalb der Fabrik sichern.“ (Schenk et al. 2014, S. 30)

Nachfrageschwankungen und dem technologischen Fortschritt immer regelmäßiger durchgeführt. Darüber hinaus erfordern auch die Internationalisierung der Unternehmen und die zunehmend geforderte Flexibilität kürzere Planungszyklen (Dombrowski und Riechel 2010, S. 1091).

Der Planungsprozess ist insbesondere durch seinen zukunftsbezogenen Charakter und turbulente externe Einflüsse gekennzeichnet, wodurch die Forderung nach steigender Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Fabriken wächst (Grundig 2015, S. 13; Kettner et al. 2010, S. 3; Hawer et al. 2015, S. 348; Kerkenberg 2016, S. 104). Die Begriffe Veränderungsfähigkeit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit werden im Folgenden näher erläutert und definiert.

Methoden der Digitalen Fabrik helfen, die nötige Anpassungsfähigkeit auf Schwankungen im Produktionsprogramm abschätzen zu können (Grundig 2015, S. 13). Die Anpassungsfähigkeit einer Fabrik oder eines Produktionsbereiches an sich wandelnde Randbedingungen stehen in Konkurrenz mit der Effizienz, die eine optimierte Ressourcennutzung und somit einen kostenoptimierten Betrieb ermöglicht (Apel et al., S. 315).

Der Oberbegriff der Veränderungsfähigkeit umfasst die verschiedenen Arten der Anpassungsfähigkeit von Fabriken. Diese spiegeln sich in der erforderlichen Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit der einzelnen Unternehmen wider (Wiendahl et al. 2010, S. 127).

Nachfolgend werden zunächst die grundlegenden Fachbegriffe zum Thema der Veränderungsfähigkeit von Fabriken definiert. Anschließend werden Grundzüge und aktuelle Entwicklungen zur Erzeugung von wandlungsfähigen Fabrik- und Layoutstrukturen beschrieben. Die vorliegende Arbeit bezieht sich bei der Betrachtung von Fabriken vorrangig auf die Produktion.

Nach Wiendahl und Hernández kann die Flexibilität als ein „[...] definierter Spielraum zur Veränderung bezeichnet werden, der lediglich eine elastische Anpassung ohne substanzielle Veränderung des Fabrikaufbaus ermöglicht.“ (Wiendahl et al. 2005, S. 13). Ergänzt wird diese Definition von Nyhuis, der Flexibilität als „[...] Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und mit nur sehr geringen finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen [...]“ beschreibt (Nyhuis et al. 2008, S. 24).

Für diese Arbeit wird, aufbauend auf den vorigen Definitionen, für die Flexibilität folgende Beschreibung zugrunde gelegt:

*Die Flexibilität eines Produktionssystems ist der vorausgedachte Spielraum, in dem eine Anpassung auf veränderte Rahmenbedingungen möglich ist, ohne eine*

*substanzielle Änderung am Produktionssystem bzw. dem Produktionslayout vorzunehmen. Dabei können die Änderungen kurzfristig umgesetzt werden, wobei kein oder nur geringer Investitionsbedarf entsteht.*

Wird die Grenze der Flexibilität überschritten, liegt ein Wandlungsbedarf vor. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Wandlungsbedarf (bezogen auf die Umplanung) als nötiger Anpassungsbedarf des Layouts an die geänderten Rahmenbedingungen verstanden.

Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen von Wiendahl und Hernández wird folgende Definition der Wandlungsfähigkeit zugrunde gelegt:

*„Wandlungsfähigkeit beschreibt das Vermögen einer Fabrik, ausgehend von internen und externen Auslösern, aktiv ihren Aufbau auf allen Ebenen bei geringem Aufwand verändern zu können.“ (Wiendahl et al. 2005, S. 13)*

Die Flexibilität grenzt sich von der Wandlungsfähigkeit somit hauptsächlich aufgrund des vorgehaltenen Fähigkeitsbereichs und eines fest definierten (Flexibilitäts-) Korridors ab, in dem eine vorgegebene Schwankung der Produktionsstückzahlen kompensiert werden kann. Wenn Veränderungsanstöße ein größeres Ausmaß annehmen als der vorgehaltene Flexibilitätskorridor abdeckt, muss sich das System wandeln (Wiendahl et al. 2010, S. 121).

Wandlungsfähigkeit umfasst daher die Flexibilität, kann jedoch zusätzlich über die vorgehaltenen Korridore hinaus im Bedarfsfall auf einen vorgedachten Lösungsraum zurückgreifen, um den geänderten Bedingungen gerecht zu werden (Wiendahl et al. 2010, S. 121; Nyhuis et al. 2008, S. 24).

Unter dem Begriff Wandlungsfähigkeit kann also die Summe aus Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit (als Grundlage des unternehmerischen Handelns) zusammengefasst werden (Dombrowski et al. 2012, S. 3).

Die Gestaltung einer wandlungsfähigen Fabrik beruht auf den in der nachfolgenden **Abbildung 2** definierten Wandlungsbefähigern.

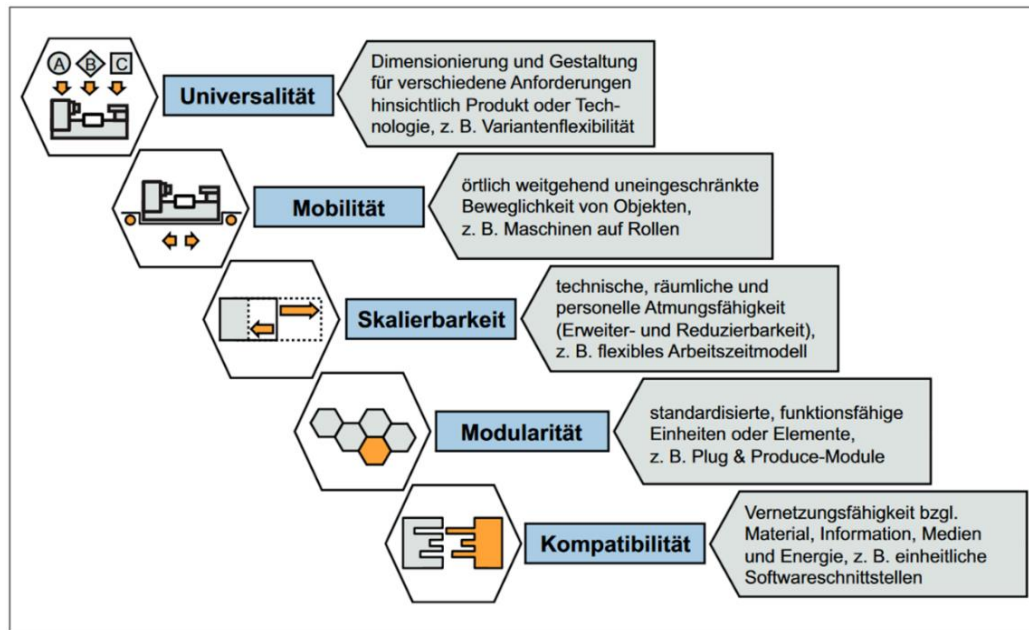


Abbildung 2: Wandlungsbefähiger einer Fabrik (Wiendahl et al. 2014, S. 133)

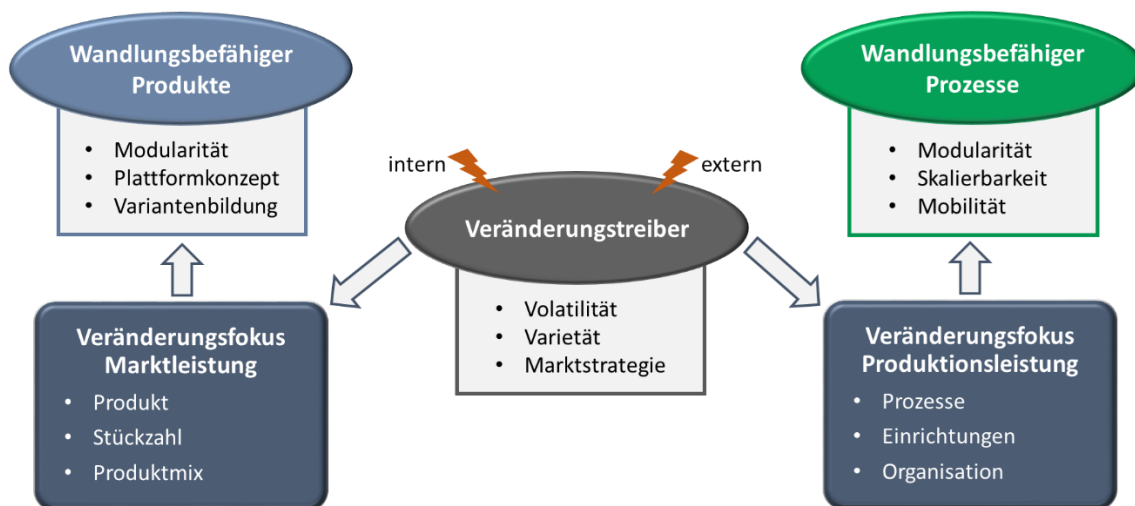
Der Begriff Wandlungsbefähiger beschreibt „... *eine individuelle und ungerichtete, abrufbare Eigenschaft eines Wandlungsobjektes zum Wandel*“ und stellt somit ein Potential der Wandlungsfähigkeit dar, das bei Bedarf abgerufen wird (Hernández 2003, S. 54). Die Wandlungsbefähiger einer Fabrik sind nach Wiendahl (2014, S. 133) und Hernández (2003, S. 54-56) durch fünf Eigenschaften gekennzeichnet. **Universalität** beschreibt die Eignung zur Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen.

Der Einsatz von standardisierten und eigenständig funktionsfähiger Einheiten kennzeichnet die **Modularität**. In Anlehnung an Plug-and-Play Ansätze aus dem Bereich Softwaretechnologie wurde für die industrielle Produktion das „Plug+Produce“ Prinzip entwickelt (Hildebrand 2005, S. 52). Ziel dieses Prinzips ist es, modulare und mobile technische Ressourcen mit geringem Aufwand zu integrieren, separieren oder substituieren und somit modulare Fabrikstrukturen einfach zu erweitern, zu reduzieren oder qualitativ zu ändern. Gleichzeitig werden Effizienz und die Vermeidung von Störungen während des laufenden Betriebs verbessert (Hildebrand 2005, S. 52).

Einen weiteren Wandlungsbefähiger stellt die **Mobilität** dar. Darunter wird die nahezu unbegrenzte Positionierbarkeit von Objekten innerhalb der Fabrik verstanden, d.h. Maschinen und Arbeitsplätze sind beweglich und können einfach neu platziert werden (Wiendahl et al. 2014, S. 133; Hildebrand 2005, S. 108). Eine Erweiter- und Reduzierbarkeit hinsichtlich Technik, Raum und Personal wird unter dem Begriff **Skalierbarkeit** zusammengefasst.

Die **Kompatibilität** als Wandlungsbefähiger ist gekennzeichnet durch eine besonders gute Vernetzungsfähigkeit, vorrangig von Versorgungseinrichtungen für Betriebsmittel, Material und Medien aber auch von Informationen. Vernetzungsfähigkeit kann beispielsweise durch ein flächendeckendes Netz der Medienversorgung erreicht werden, wodurch sich Maschinen und Arbeitsplätze beliebig und ohne zusätzliche Umbaumaßnahmen in der Fabrik platzieren lassen (Wiendahl et al. 2014, S. 133; Hernández 2003, S. 55–56).

In der vorliegenden Arbeit wird die Anpassung bzw. laufende Optimierung von Produktionslayouts bei sich verändernden Produktionsaufträgen thematisiert. Um seine Produktion bei entsprechender Auftragslage wandeln zu können, werden nach Wiendahl die in der nachfolgenden **Abbildung 3** dargestellten Gestaltungsfelder der Veränderungsfähigkeit betrachtet.



**Abbildung 3:** Gestaltungsfelder der Veränderungsfähigkeit (Darstellung in Anlehnung an Wiendahl et al. 2014, S. 134)

Interne und externe Veränderungstreiber führen einerseits zu Umgestaltungen am Produkt, einer Variation der Stückzahl oder des Produktmixes und rücken somit die Marktleistung in den Veränderungsfokus. Andererseits sind auch Anpassungen an Prozessen, Einrichtungen, Maschinen oder der Organisation vorzunehmen, wodurch die Produktionsleistung in den Fokus der Veränderung rückt. Wandlungsbefähiger auf der Produkt- und der Prozessseite begünstigen eine reaktionsschnelle Anpassung bei geänderten Rahmenbedingungen. Ergänzend zur klassischen Fabrikplanung müssen diese Gestaltungsfelder so bearbeitet werden, dass die angestrebte Veränderungsfähigkeit erreicht wird (Wiendahl et al. 2014, S. 134–135).



Bereits in einer im Jahr 2005 durchgeführten Breitenbefragung gaben 26% der teilnehmenden Unternehmen an, dass sie die Materialflüsse „[...] öfter als einmal im Jahr bis hin zu jedem Vierteljahr [...]“ anpassen (Bierschenk et al. 2005, S. 35). Diese Veränderungen werden während des Betriebes vorgenommen, um sich besser auf veränderte Rahmenbedingungen (z.B. durch veränderte Auftragslage oder wechselndes Produktionsprogramm) einzustellen. Dabei werden wesentliche Aspekte reflektiert, strukturiert angepasst und ein neues Layout geplant (Bierschenk et al. 2005, S. 35). Mit der weiteren Entwicklung, z.B. der Plug+Produce Ansätze, ist davon auszugehen, dass sich diese Tendenz weiter verstärken wird, d.h. weitere Unternehmen ebenfalls häufiger Anpassungen der Layouts vornehmen.

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird der Fokus auf die Wandlungsbefähiger der Prozesse gelegt, da diese die Anpassungsfähigkeit der Produktionslayouts stark beeinflussen. Insbesondere die Modularität und Mobilität ermöglichen eine schnelle räumliche Positionierung der Maschinen und Anlagen, welche bei der Layoutplanung während des Betriebes zur Anpassung auf neue Rahmenbedingungen zu optimieren ist. Ebenfalls sind die gebäudeseitigen Wandlungsbefähiger zu berücksichtigen.

Die steigenden Anforderungen hinsichtlich der Modularität und Mobilität der Ressourcen werden durch die Maschinen- und Anlagenhersteller aufgegriffen, wie die nachfolgende **Abbildung 4** verdeutlicht.



**Abbildung 4: Mobilität und Modularität technischer Ressourcen (KUKA Systems GmbH 2018)**

In Anlehnung an die Ausführungen von (Hildebrand 2005, S. 108) zum Plug+Produce Prinzip wird in dieser Arbeit unter Mobilität die Basis für eine Veränderung der innerbetrieblichen Standorte der technischen Ressourcen verstanden. Mobile technische Ressourcen, wie z.B. Roboter, können schnell ihren Einsatzort wechseln und sind innerhalb kürzester Zeit betriebsbereit. Neben mobilen Robotern werden auch mobile Arbeitsplätze und Produktionsmodule eingesetzt (siehe **Abbildung 5**).



**Abbildung 5: Mobile Arbeitsplätze und Produktionsmodule – Bildquelle: (SmartFactory KL 2019)**

Mit mobilen technischen Ressourcen können Produktionslayouts effizient an neue Anforderungen angepasst werden, da Arbeitsplätze und Produktionsmodule mit geringem Aufwand neu positioniert werden können. Diese Anforderungen werden auch auf größere Werkzeugmaschinen übertragen (siehe **Abbildung 6**).



**Abbildung 6: Steigerung der Mobilität von Maschinen durch Container – Bildquelle: (Clegg Industries 2019)**

Durch die Unterbringung der Maschinen und der erforderlichen Schaltschränke in Containern wird die Mobilität gesteigert. Die Maschinencontainer können für den modulartigen Aufbau eines Fertigungsbereiches eingesetzt werden.

Neben den mobilen Arbeitsplätzen, Modulen und Maschinen müssen auch bezüglich der Produktionshalle verschiedene Wandlungsbefähiger vorliegen. In der nachfolgenden **Abbildung 7** sind die wesentlichen für die Produktionshalle zugrunde gelegten Wandlungsbefähiger beispielhaft dargestellt.



**Abbildung 7: Wandlungsbefähiger von Maschinen und Gebäuden – Bildquelle: (Startup Factory 2019)**

Eine Ausprägung des Wandlungsbefähigers Kompatibilität stellt die Vernetzungsfähigkeit dar, die durch ein flächendeckendes Versorgungsraster von Energie und Medien, wie z.B. Druckluft, realisiert wird. Die nötige Universalität lässt schließlich durch die Auswahl und Dimensionierung der Arbeitsplätze, Module und Maschinen erreichen.

Die genannten Wandlungsbefähiger im Hallenbereich ermöglichen eine Anpassung der Layouts auf sich ändernde Rahmenbedingungen und helfen, die kürzer werdenden Produktlebenszyklen und wechselnde Anforderungen aus dem turbulenten Wettbewerbsumfeld besser zu berücksichtigen.

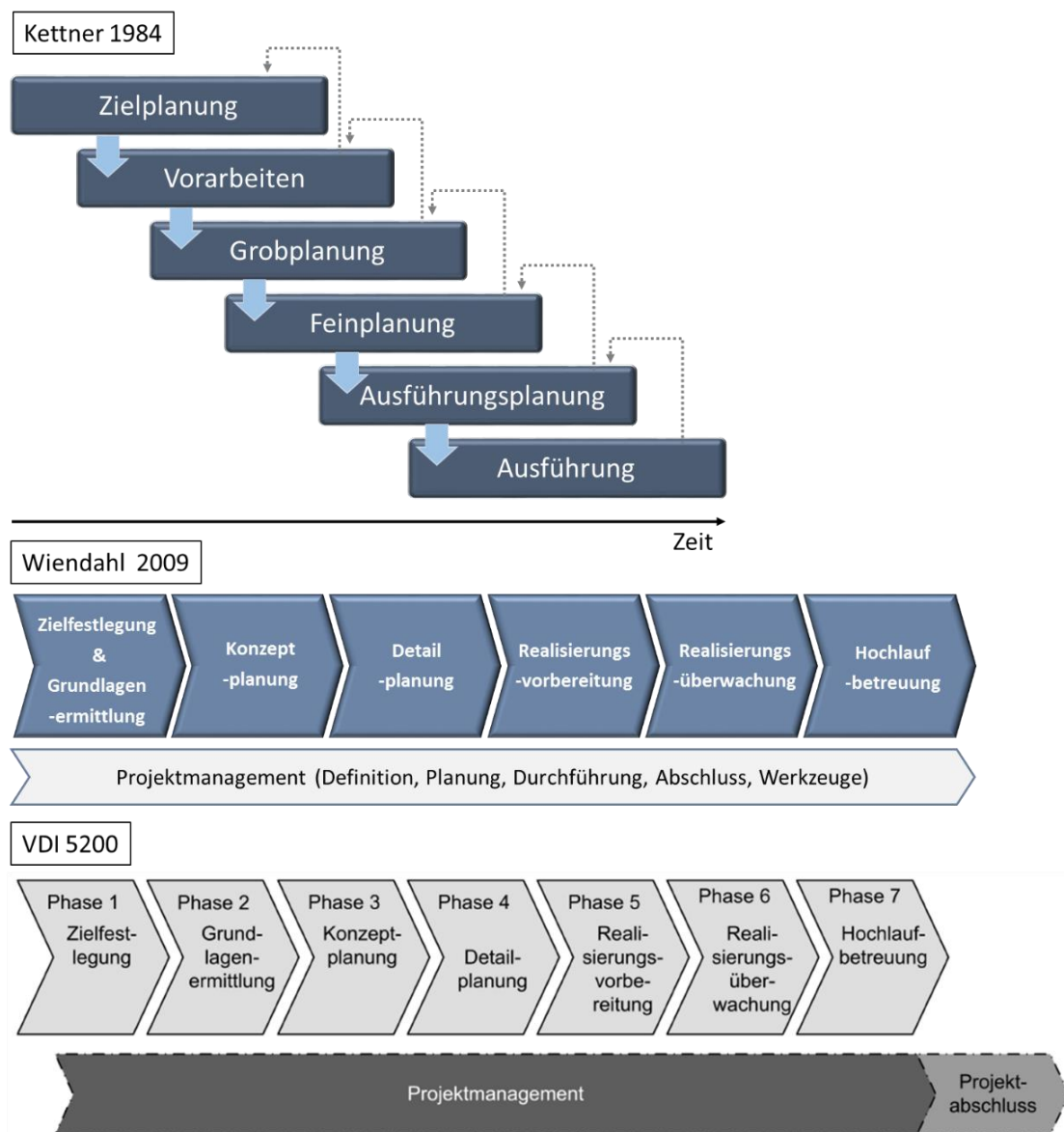
Mit der zu entwickelnden Gesamtmethodik soll es ermöglicht werden, im Sinne einer kontinuierlichen Planung, die laufende Anpassung und Optimierung der Layouts hinsichtlich der sich wandelnden Auftragslagen und Produktionsbedingungen zu unterstützen. Der Einsatz mobiler und modularer Ressourcen bildet im weiteren Verlauf der Arbeit die Grundlage für die Wandlungsfähigkeit eines Produktionslayouts. Für das Anwendungsbeispiel der Umplanung (Kapitel 5.3) werden die Wandlungsbefähiger Mobilität,



Kompatibilität und Universalität fokussiert. Ein Hallenkonzept ohne Säulenraster in der Produktionsfläche gewährleistet die freie Positionierbarkeit der Module und Arbeitsplätze.

### 2.1.2 Ablauf von Fabrikplanungsprojekten

Der Ablauf von Fabrikplanungsprojekten lässt sich in unterschiedliche Planungsphasen unterteilen. Diese Einteilung des Fabrikplanungsprozesses wird von verschiedenen Autoren vorgenommen, unterscheidet sich aber oftmals nur im Umfang der einzelnen Phasen. In der nachfolgenden **Abbildung 8** sind gängige Einteilungen nach Kettner et al., Wiendahl et al. und der VDI 5200 dargestellt.



**Abbildung 8:** Phasen des Fabrikplanungsprozesses in Anlehnung an (Kettner et al. 2010, S. 5; Wiendahl et al. 2010, S. 429; VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 8)

Die Einteilung der Planungsphasen nach Wiendahl et al. und VDI Richtlinie 5200 sind nahezu identisch. Eine Abweichung ergibt sich nur bei der Betrachtung der Phasen Zielfestlegung und Grundlagenermittlung. Wiendahl et al. fassen diese Schritte (im Gegensatz zur VDI Richtlinie 5200) zusammen. Beide Phasenmodelle unterscheiden sich im Umfang zum Modell von Kettner et al., da sie zusätzlich die Phase der Hochlaufbetreuung abdecken.

Diese Phasen lassen sich nach Wiendahl et al. und VDI 5200 mit den Leistungsphasen der Objektplanung nach HOAI verknüpfen. Das Prozessmodell der synergetischen Fabrikplanung nach Wiendahl et al. sieht darüber hinaus eine Kopplung mit den Phasen der Produktionsplanung (Analyse, Strukturdesign, Layoutgestaltung, Umsetzung) vor und muss durch das begleitende Projektmanagement unterstützt werden (Wiendahl et al. 2010, S. 428–429).

Die Phasenmodelle von Kettner et al. und des VDI unterscheiden sich im Wesentlichen darin, dass in Kettners Beschreibung die Phasen nicht klar voneinander abgegrenzt sind, sondern vielmehr fließende Übergänge vorliegen und teilweise parallel durchgeführt werden können. Dabei kann es häufiger zu Rückkopplungen zwischen den einzelnen Phasen kommen (Kettner et al. 2010, S. 5). In der VDI Richtlinie 5200 hingegen wird der Ablauf als sequenziell und auch iterativ beschrieben. Im Folgenden wird weiterhin aufgrund der großen Ähnlichkeit der Phasenmodelle und die weite Verbreitung und Anerkennung auf die Beschreibung der VDI Richtlinie 5200 Bezug genommen.

Während des Fabrikplanungsprozesses werden verschiedene Planungsebenen betrachtet. Diese lassen sich nach (Schenk et al. 2014, S. 332–333) folgendermaßen einteilen:

- **Generalbebauungsplanung** - Anordnung von Gebäuden, Produktionshallen, Freilagerflächen, etc.
- **Groblayoutplanung** - Anordnung von Fertigungsbereichen, Lagerflächen, etc.
- **Feinlayoutplanung** - Anordnung von Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen unter Betrachtung der Transportwege

Diese drei Planungsebenen sind in der Regel während einer Gesamtfabrikplanung mit steigendem Detaillierungsgrad innerhalb der zu durchlaufenden Planungsphasen zu bewältigen. Allerdings ist es je nach Planungsproblem auch möglich, direkt die Grob- oder Feinlayoutplanung durchzuführen. Zu beachten ist dabei, dass zwischen den Planungsebenen Rückkopplungen entstehen können (Schenk et al. 2014, S. 333). Lange Fabrikplanungszyklen und verhältnismäßig kurze Produkt- und Technologielebenszyklen führen dazu, dass die Groblayout-

und Feinlayoutplanung im Rahmen von Umplanungen häufiger durchlaufen werden. Der Fokus der in dieser Arbeit zu entwickelnden Methodik ist auf die Feinlayoutplanung mit Transportwegen ausgerichtet, kann jedoch auf die Planung von Groblayouts übertragen werden. Mit der Methodik soll die Neu- und die Umplanung unterstützt werden.

### 2.1.3 Layoutplanung

Die Layoutplanung ist ein komplexer Planungsvorgang, der sich mit der Suche nach einer günstigsten Anordnung von Objekten bzw. Organisationseinheiten unter Berücksichtigung vorgegebener Zielkriterien beschäftigt. Je nach Detaillierungsgrad und Planungsebene befasst sich die Layoutplanung mit der Platzierung von Anlagen und Maschinen innerhalb einer Halle oder auch der Gebäude und Lagerflächen innerhalb eines Werksgeländes (Schmigalla 1995, S. 345; Scholz 2010, S. 3). Layoutplanung wird auch als innerbetriebliche Standortplanung bezeichnet. In der englischsprachigen Literatur wird diese Aufgabe auch mit dem Begriff „Facility Layout Problem“ bezeichnet (Kubaschewski 2016, S. 10; Scholz 2010, S. 3), welcher insbesondere bei der Beschreibung der mathematischen Anordnungsverfahren häufig verwendet wird.

#### 2.1.3.1 Ziele der Layoutplanung

Das Ziel der Layoutplanung ist die „*anforderungsgerechte räumliche Anordnung aller Planungsobjekte*“ (Bracht et al. 2018b, S. 43), um einen wirtschaftlichen und störungsfreien Fertigungsablauf zu gewährleisten (Schenk et al. 2014, S. 331). Eine Hauptaufgabe ist daher die optimale Anordnung von Funktionsbereichen und Betriebsmitteln auf den verfügbaren Flächen. Ein weit verbreitetes Kriterium für die Anordnung ist die Minimierung des Transportaufwands<sup>2</sup>. Die Standortbestimmung der Betriebsmittel und Funktionseinheiten auf den verfügbaren Flächen entspricht einem Planungsproblem, bei dem die anzuordnenden Objekte auf die vorhandene Plätze zugeordnet werden (Schmigalla 1995, S. 118; Bracht et al. 2017, S. 200).

Ein zentraler Betrachtungsgegenstand in der Layoutplanung sind die Verbindungen bzw. Flussbeziehungen zwischen den anzuordnenden Objekten. Die Flüsse (quantitativ und qualitativ) zwischen den Objekten beeinflussen deren

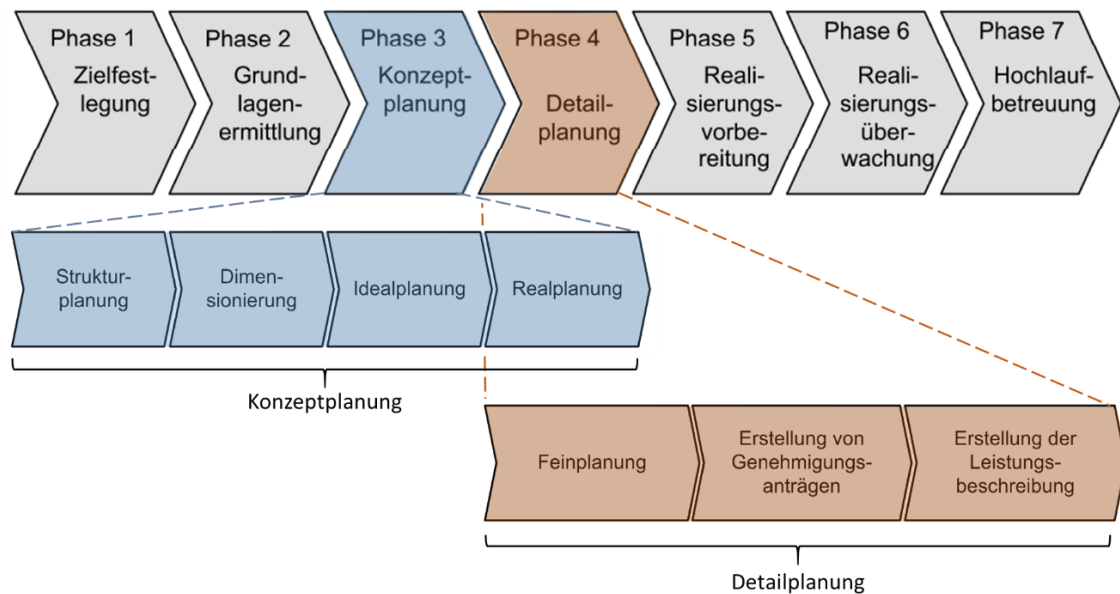
---

<sup>2</sup> Häufig werden auch (in Abhängigkeit von der Bezugsgröße) das Transportmoment oder die Transportkosten verwendet.

räumliche Anordnung und sollen in einer Gesamtlösung integriert werden (Schenk et al. 2014, S. 331–332). Dadurch wird ein möglichst reibungsloser Betrieb gewährleistet.

### 2.1.3.2 Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess

Die Layoutplanung findet, als wichtiger Bestandteil des Fabrikplanungsprozesses nach VDI Richtlinie 5200, vorwiegend in der dritten Phase (Konzeptplanung) und in der vierten Phase (Detailplanung) statt (**Abbildung 9**).



**Abbildung 9:** Einordnung der Layoutplanung in die Fabrikplanungsphasen nach VDI 5200

Während der Konzeptplanungsphase werden zunächst in der *Strukturplanung* funktionale und organisatorische Einheiten mit ihren Zusammenhängen und Flussbeziehungen festgelegt. Anschließend sind im Rahmen der *Dimensionierung* erforderliche Kapazitäten und Flächenbedarfe zu ermitteln (VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 13). Diese Planungsgrundlagen beinhalten zudem Informationen über das Produktionsprogramm (Schenk et al. 2014, S. 335–336). Wenn diese Daten vorliegen, werden in den Teilphasen *Idealplanung* und *Realplanung* Layouts entwickelt, die darüber hinaus in der Feinplanung als Teil der Detailplanungsphase zur Umsetzungsreife gebracht werden.

Das Ideallayout stellt eine optimale bzw. idealisierte Lösung dar, bei der keine Restriktionen betrachtet werden (VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 14; Grundig 2015, S. 159; Aggteleky 1987, S. 57). Die Struktur des Ideallayouts kann durch die Verwendung von Methoden zur Anordnungsoptimierung bestimmt werden (Schenk et al. 2014, S. 340; Müller et al. 2009, S. 38). Einen wesentlichen Aspekt

bei der Anordnung der Objekte stellt der Materialfluss dar. Bei der Anordnungsoptimierung ist daher die Minimierung des Transportaufwandes ein häufig verwendetes Kriterium. Zur Lösung dieser Zuordnungsproblematik wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, wie z.B. das Kreisverfahren, das Dreiecksverfahren oder das Double-Row-Facility-Layout-Problem (Bracht et al. 2017, S. 200; Kettner et al. 2010, S. 228; Günther 2005). Ausgewählte Verfahren werden in Kapitel 2.2 dieser Arbeit behandelt.

In Verbindung mit dem bei der Dimensionierung ermittelten Flächenbedarf<sup>3</sup> lässt sich ein flächenmaßstäbliches Beziehungsschema aufstellen, das eine erste Abschätzung der relativen Größe der Objekte zueinander ermöglicht und zusammen mit der optimierten Anordnung zu einem Blocklayout entwickelt werden kann (Schenk et al. 2014, S. 341), welches ebenfalls ohne Restriktionen erstellt wird.

Während der Realplanung werden Randbedingungen aus unterschiedlichen Bereichen (z.B. Auflagen, bauliche oder finanzielle Einschränkungen, etc.) für die Planung eingeführt, spezifiziert und bei der Generierung von Reallayoutvarianten berücksichtigt. Folglich ist das Ziel dieser Phase die Entwicklung und Bewertung von Layoutvarianten, die alle Planungsrestriktionen einbeziehen (VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 14). Dabei ist die Erstellung und Betrachtung mehrerer Varianten ein wichtiger Grundsatz der Planung. Aus den geplanten Alternativen wird eine beste Gesamtlösung ermittelt und ausgewählt (Hompel et al. 2007, S. 323; VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 14).

Abschließend wird die ausgewählte Reallayoutvariante bzw. das entsprechende Groblayout während der Feinplanung detailliert. Materialflüsse, Ressourcen, Logistikeinrichtungen werden spezifiziert, in das Groblayout integriert und somit in ein Feinlayout überführt (VDI-Richtlinie 5200 2011, S. 15–16).

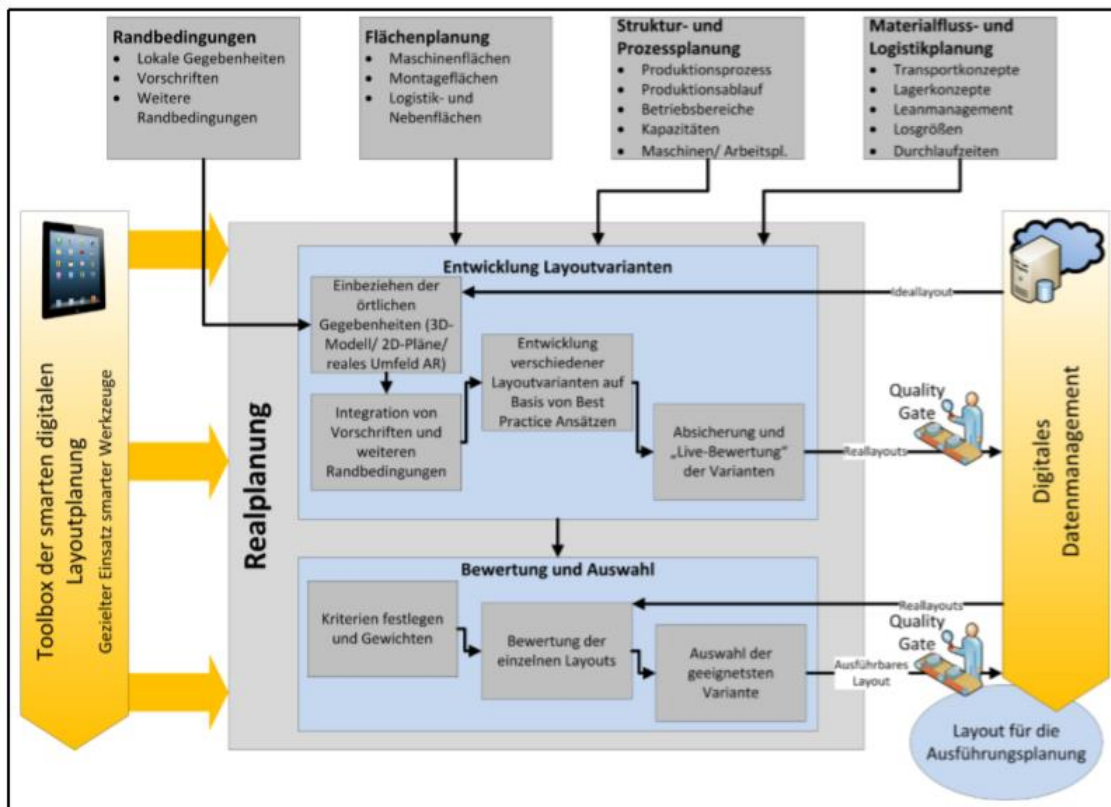
Die Fabrikplanungsphasen werden bei einer Neuplanung i.d.R. vollständig durchlaufen. Aufgrund der langen Lebenszyklen von Fabriken (im Verhältnis zu den Produkt- und Technologielebenszyklen) werden Umplanungen wesentlich häufiger durchgeführt als Neuplanungen. Für Umplanungen ist es jedoch nicht immer erforderlich den vollständigen Planungsprozess zu durchlaufen, wie der Ansatz der smarten digitalen Layoutplanung von Brosch (2014) zeigt. Klassische Vorgehen zur Layoutplanung zielen insbesondere auf Neu- und

---

<sup>3</sup> Die Flächenbedarfsermittlung kann je nach Planungsphase und Planungsebene mit unterschiedlichen Methoden wie z.B. der rechnerischen oder kennzahlenbasierten Flächenbedarfsermittlung sowie mittels Probelayouts erfolgen. (Kettner et al. 2010, S. 62–64)



Restrukturierungsplanungen ab (Brosch 2014, S. 67). Bei Umplanungen ergeben sich jedoch andere Anforderungen, da sich z.B. beim Durchlaufen der Phase der Idealplanung keine Vorteile erzielt werden können, die sich im Planungsprozess vollständig nutzen lassen. Die smarte digitale Layoutplanung fokussiert sich daher auf die Realplanung (Brosch 2014, S. 79). Der Ablauf des Planungsansatzes nach Brosch (2014) ist in der nachfolgenden **Abbildung 10** dargestellt.



**Abbildung 10: Ablauf der smarten digitalen Layoutplanung (Brosch 2014, S. 81)**

Bei der smarten digitalen Layoutplanung werden zunächst die örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen analysiert und für das Planungsproblem aufbereitet. Anschließend werden verschiedene Layoutvarianten entwickelt, wobei Best Practice Lösungen und Planungsansätze einbezogen werden können. Diese vorgefertigten Ansätze liegen in einer Bibliothek vor (Brosch 2014, S. 81).

Die Varianten werden durch Werkzeuge zur Absicherung z.B. hinsichtlich des Flächenbedarfs überprüft und anschließend durch ein Quality Gate die Erfüllung der bestehenden Anforderungen analysiert (Brosch 2014, S. 82). Anschließend werden die Varianten bewertet und die am besten für die Realisierung geeignete Variante ausgewählt. Die smarte digitale Fabrikplanung stellt durch die Verkürzung des Planungsprozesses und die Unterstützung durch verschiedene Werkzeuge einen grundlegenden Ansatz für die Umplanung dar.

### 2.1.3.3 Partizipative Layoutplanung

Fabrikplanung ist eine multidisziplinäre Aufgabe. In den Fabrikwissenschaften werden daher weitere Wissenschaftsdisziplinen z.B. aus den Bereichen Technik-, Wirtschafts-, Arbeits-, Sozial- und Naturwissenschaft integriert (Schenk et al. 2014, S. 10; Spur und Stöferle 1994, S. 13–14). Um den vielfältigen Planungsanforderungen gerecht zu werden, müssen die Experten aus diesen Fachbereichen sowie die Mitarbeiter und deren spezifisches Wissen in die Planung einbezogen werden.

Eine entsprechende Auswahl der Mitarbeiter und Kompetenzen erfolgt spezifisch für jeden Planungsfall und hat einen wesentlichen Einfluss auf den Erfolg des Planungsvorhabens (Dombrowski et al. 2011, S. 696; Menzel 2000, S. 54; Kerkenberg 2014, S. 436).

Die partizipative Planung erzielt durch die Nutzung der fachlichen Kompetenzen, Kreativität der Planungsbeteiligten sowie dem vernetzten Wissen positive Effekte auf die Planungsqualität, Planungszeit und Akzeptanz der Planungslösung (Schenk et al. 2014, S. 11; Dombrowski et al. 2011, S. 697; Schenk und Wirth 2004, S. 197–198; Westkämper 2000, S. 94; Dombrowski und Riechel 2010, S. 1092–1093).

Jedoch werden häufig in Planungsprojekten die Mitarbeiter aus der Produktion entweder erst sehr spät in den Planungsprozess eingebunden oder aus strategischen bzw. unternehmensinternen Gründen nicht in die Planung einbezogen.

Eine kontinuierliche und innovationsorientierte Planung kann vor allem mit kurzen Planungszeiten und realitätsnahem Detaillierungsgrad erfolgen, wenn ein digitalisiertes Fabrikmodell mit aktuellen Daten vorliegt und eine partizipative Planung möglich ist, die durch autonome Planungsteams ausgeführt wird (Westkämper 2000, S. 92; Dombrowski und Riechel 2010, S. 1091).

Die Zusammensetzung dieser Planungsteams muss dabei individuell festgelegt werden. Während bei der Planungsebene der Generalbebauungsplanung vorrangig Experten und Entscheider in den Prozess zu integrieren sind, um strategisch relevante Layouts zu entwickeln, gelten beispielsweise für regelmäßige Planungen von Produktionslayouts andere Anforderungen. Bei regelmäßigen Umplanungen sind die Planungsexperten nicht ständig verfügbar. Darüber hinaus ist die kontinuierliche Planung von Produktionslayouts weniger auf die Entwicklung von langfristigen und strategischen Varianten ausgerichtet. Hier wird verstärkt das Fachwissen der betroffenen Mitarbeiter aus den Produktionsbereichen (z.B. Betriebsingenieure, Meister und Werker) benötigt. Um diese in den Planungsprozess einzubinden, müssen geeignete Werkzeuge verwendet werden,

die es allen Beteiligten ermöglicht, sich aktiv in die Layoutgestaltung einzubringen. Der Planungstisch stellt ein wichtiges Werkzeug dar, um eine partizipative und digitale Layoutplanung zu ermöglichen. In Kapitel 2.3.2 wird daher eine nähere Einführung gegeben.

Selbst in der Automobilindustrie, die hinsichtlich der Umsetzung der Digitalen Fabrik eine Vorreiterrolle einnimmt, ist die Aktualität der digitalen Modelle eine Herausforderung. Ein Grund dafür ist beispielsweise die Abweichung des Planungsmodells von der Realität durch auftretende Änderungen während der Bau-/Realisierungsphase (Bracht et al. 2015, S. 641). Die mangelnde Verfügbarkeit eines aktuellen, digitalen Fabrikmodells stellt für die meisten Unternehmen also ein wesentliches Hindernis dar. Demnach wird auch die Durchführung einer partizipativen Planung durch den hohen Vorbereitungsaufwand gehemmt.

## 2.2 Anordnungsverfahren in der Layoutplanung

Die Bestimmung von Layout-Anordnungen ist ein grundlegender Bestandteil des Planungsprozesses. Zur Lösung der Anordnungsproblematik wurden zahlreiche Anordnungsverfahren entwickelt (siehe **Abbildung 11**).

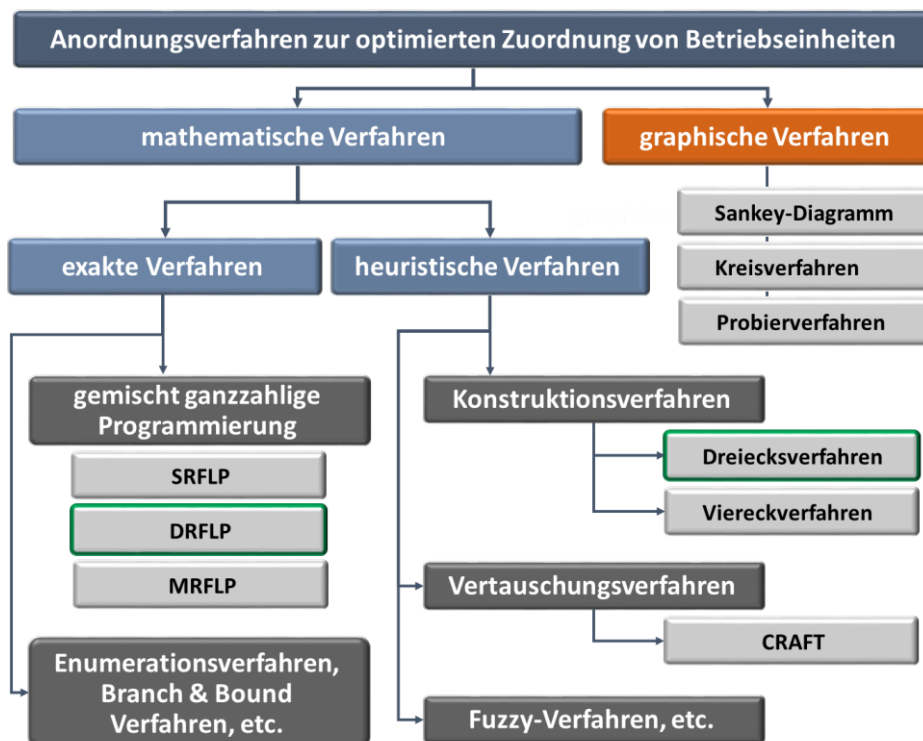


Abbildung 11: Klassifizierung der Anordnungsverfahren zur optimierten Zuordnung von Betriebseinheiten in Anlehnung an (Kettner et al. 2010, S. 228; Arnold et al. 2008, S. 319; Bogatzki 1998, S. 19–21)

Die Abbildung gibt einen Überblick über die Klassifizierung der Anordnungsverfahren und ordnet die in der Arbeit betrachteten und weitere beispielhafte Verfahren ein. Grundsätzlich lassen sich die Anordnungsverfahren in mathematische und graphische Verfahren unterscheiden. Graphische Ansätze zur Anordnungsplanung und –optimierung basieren auf einer möglichst übersichtlichen Visualisierung der Flussbeziehungen zwischen den anzuordnenden Objekten. Die Positionierung soll dabei mit möglichst wenig Überschneidungen der Materialflussverbindungen erfolgen. Die mathematischen Verfahren können weiter in exakte und heuristische Ansätze differenziert werden und sind durch feste Rechen- und Anordnungsvorschriften charakterisiert. Die in der Abbildung grün hervorgehobenen Verfahren, das Double-Row-Facility-Layout-Problem (DRFLP) und das Dreiecksverfahren werden im Rahmen dieser Arbeit detaillierter betrachtet und sollen in die Planungsmethode integriert werden.

Im folgenden Abschnitt 2.2.1 werden graphischen Verfahren erläutert und die Grenzen für den praktischen Planungseinsatz aufgezeigt. Aufgrund der hohen Relevanz der mathematischen Anordnungsverfahren in der Praxis und für diese Arbeit werden in Abschnitt 2.2.2 die Verfahren detaillierter betrachtet sowie eine Einordnung zum Stand der Technik gegeben.

### 2.2.1 Graphische Verfahren

Das Sankey-Diagramm (Liebetruth 2016, S. 38–39), das Kreisverfahren nach Schwerdtfeger (Grundig 2015, S. 165–166) und das Probierversfahren (Grundig 2015, S. 175) lassen sich den graphischen Anordnungsmethoden zuordnen. In der nachfolgenden **Abbildung 12** wird beispielhaft ein Sankey-Diagramm und das Kreisverfahren dargestellt.

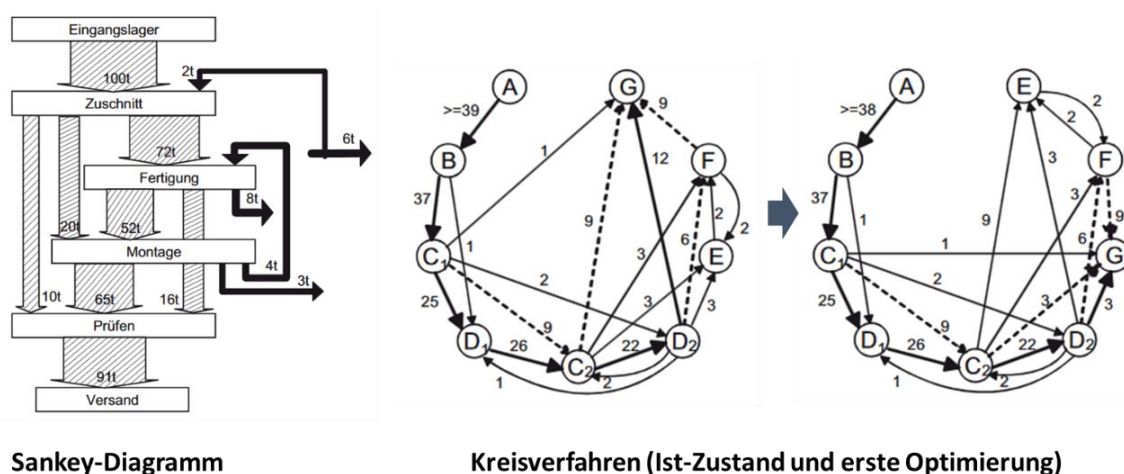


Abbildung 12: Sankey-Diagramm und Kreisverfahren (Pawellek 2014, S. 202)

Sankey-Diagramme dienen der übersichtlichen Darstellung der zwischen Betriebseinheiten vorliegenden Materialflüsse und der Bearbeitungsreihenfolge, wobei die Breite der Flüsse die Transportmengen widerspiegelt (Arnold et al. 2008, S. 312; Liebetruß 2016, S. 38). Die Wege zwischen Objekten mit breiten Flussbeziehungen sollten bei der Planung möglichst kurz gestaltet werden. Das Sankey-Diagramm enthält jedoch keine Informationen über die räumliche Anordnung oder Weglängen und wird bei steigender Anzahl an Objekten und Flüssen schnell unübersichtlich (Kettner et al. 2010, S. 173; Arnold et al. 2008, S. 312, S.319).

Das Kreisverfahren nach Schwerdtfeger beginnt mit der Anordnung der Objekte auf einem Kreis. Anschließend wird schrittweise eine Vertauschung der Objekte vorgenommen, um die stärksten Materialflussbeziehungen in möglichst direkter Nähe anzuordnen (Grundig 2015, S. 165–166). Daher kann das Kreisverfahren gleichzeitig auch den heuristischen Verfahren zugeordnet werden. Analog zum Sankey-Diagramm werden auch bei diesem Verfahren die Stärke der Materialflussbeziehungen durch die Breite der Verbindungslinien dargestellt (Heiserich et al. 2011, S. 210; Kettner et al. 2010, S. 229; Arnold et al. 2008, S. 319). Ziel ist es, dass die intensivsten Materialflüsse nicht durch die Freifläche innerhalb des Kreises geplant werden, damit transportintensive Verbindungen geringe Abstände erhalten (Heiserich et al. 2011, S. 210; Grundig 2015, S. 166).

Graphische Verfahren weisen neben dem Vorteil der Einfachheit einige Nachteile auf. Bei steigender Anzahl der anzuordnenden Objekte werden sie schnell unübersichtlich. Darüber hinaus liegt ihnen keine feste Systematik zugrunde. Eine Verbesserung der Anordnungslösung wird durch Probieren erzielt oder erfolgt „mit Hilfe eines auf Erfahrung beruhenden Vorgehens“ (Kettner et al. 2010, S. 229). Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist daher nicht gewährleistet. Aus diesen Gründen sind die Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt.

### **2.2.2 Mathematische Anordnungsverfahren**

Zur Unterstützung der Layoutplanung und Lösung der Anordnungsproblematik wurden zahlreiche Ansätze und Verfahren entwickelt, um die Schwachstellen der graphischen Verfahren zu umgehen. Die mathematischen Anordnungsverfahren lassen sich in heuristische sowie analytische Methoden unterteilen. Diese unterscheiden sich insbesondere im erforderlichen Rechenaufwand. (Eversheim und Schuh 1999, S. 25; Schenk et al. 2014, S. 329; Kettner et al. 2010, S. 230; Bogatzki 1998, S. 21–22).

Allgemein ist bei den Anordnungsverfahren eines der wichtigsten Kriterien die Minimierung des Transportaufwandes (Grundig 2015, S. 159; Schmigalla 1995, S.

119; Shouman et al., S. 1; Drira et al. 2007, S. 260; Warnecke und Dangelmaier 1981, S. 3). Dieses Zielkriterium lässt sich mit der nachfolgenden mathematischen Zielfunktion beschreiben:

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n m_{ij} \cdot s_{ij}$$

Die Zielfunktion setzt sich aus der Anzahl der anzuordnenden Objekte  $n$ , den Transportintensitäten  $m_{ij}$  und den Distanzen zwischen den Objekten  $s_{ij}$  zusammen. Bei der Lösung eines Anordnungsproblems soll also die Summe der Produkte aus den Transportmengen und den Entfernungen und somit der Transportaufwand zwischen allen Objekten minimiert werden (Kettner et al. 2010, S. 228; Arnold 1998, S. 224; Grundig 2015, S. 160). Die bestmögliche Lösung dieses Optimierungsproblems wird als globales Optimum bezeichnet. Das globale Optimum liegt vor, wenn es keine weitere zulässige Lösung gibt, die einen besseren Wert der Zielfunktion erreicht. In dieser Arbeit bezieht sich das globale Optimum auf das Transportmoment, das durch die Anordnung der Maschinen oder Betriebseinheiten zu minimieren ist. Da reale Layoutplanungsaufgaben eine Vielzahl relevanter Kriterien und Zielsetzungen beinhalten, ist die Suche nach einer optimalen Lösung sehr komplex und durch eine Gewichtung der Zielkriterien subjektiv geprägt. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit unter dem globalen Optimum ausschließlich die mathematisch exakt bestimmte Optimierungslösung hinsichtlich des Zielkriteriums Transportmoment verstanden.

### 2.2.2.1 Heuristische Anordnungsverfahren

Heuristische Verfahren (kurz: Heuristiken) werden zur Ermittlung von zulässigen und guten Lösung von Optimierungs- und Anordnungsproblemen verwendet. Eine Heuristik beinhaltet Vorgehensregeln bzw. kann als Vorgehensweise zur Bestimmung von Lösungen verstanden werden (Domschke und Scholl 2006, S. 2; Domschke et al. 2015, S. 135).

Heuristiken lassen sich also durch die Verwendung von festgelegten Entscheidungsoperatoren<sup>4</sup> charakterisieren, die „*potentielle Lösungen vom Suchprozess ausschließen*“ können (Streim 1975, S. 149). Mit den heuristischen Verfahren lassen sich schnell zulässige und optimierte Lösungen erzeugen, jedoch kann nicht garantiert werden, dass die gefundene Lösung tatsächlich ein (globales)

---

<sup>4</sup> Entscheidungsoperatoren werden auch heuristische Regeln genannt. Diese basieren z.B. auf Erfahrungswissen. (Streim 1975, S. 148)

Optimum darstellt (Merker 1998, S. 29; Kettner et al. 2010, S. 230; Schenk et al. 2014, S. 326; Heiserich et al. 2011, S. 211; Meier 2009, S. 24).

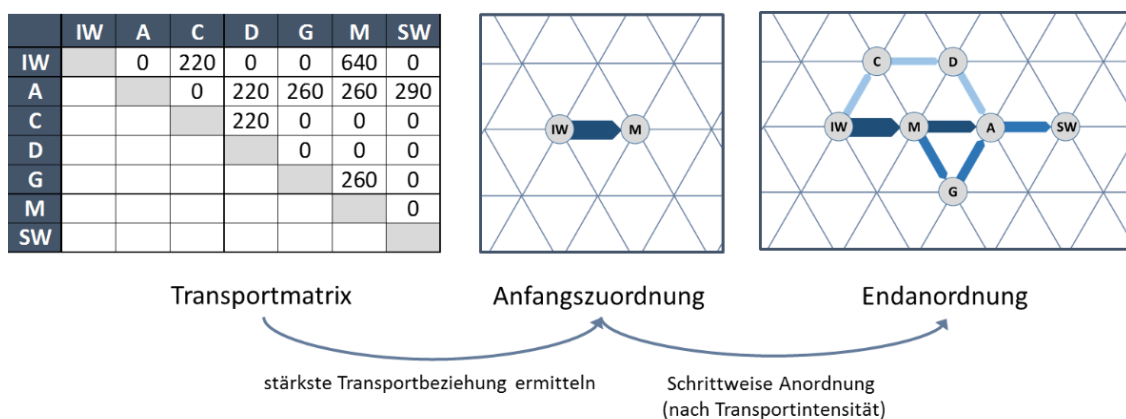
Die heuristischen Anordnungsverfahren umfassen mehrere Unterkategorien, z.B. die Verbesserungs- und Konstruktionsverfahren oder Metastrategien wie Genetische Algorithmen (Arnold und Furmans 2009, S. 293; Domschke et al. 2015, S. 136–139; Bogatzki 1998, S. 25–26; Meier 2009, S. 23–24).

### Konstruktionsverfahren

Konstruktionsverfahren werden in der Literatur auch als Aufbau- oder Eröffnungsverfahren bezeichnet (Domschke und Scholl 2006, S. 4; Grundig 2015, S. 164). Charakteristisches Merkmal dieser Verfahren ist die schrittweise Anordnung der Objekte unter Beachtung von Anordnungsvorschriften (Heiserich et al. 2011, S. 211; Arnold 1998, S. 228).

Die in den Einzelschritten getroffenen Anordnungsentscheidungen können als optimal angesehen werden. Allerdings stellt die ermittelte Gesamtlösung nicht zwangsläufig ein Optimum dar (Arnold und Furmans 2009, S. 294).

Ein etabliertes und verbreitetes Verfahren zur Layoutplanung ist das **modifizierte Dreiecksverfahren nach Schmigalla** (Grundig 2015, S. 164; Schenk et al. 2014, S. 326; Schmigalla 1995, S. 127, 1968, S. 119–121). Die Anordnungsoptimierung nach dem Dreiecksverfahren liefert eine Strukturgrafik, welche Informationen über die Lage aller angeordneten Objekte beinhaltet (Schenk et al. 2014, S. 326). **Abbildung 13** stellt den prinzipiellen Ablauf des Verfahrens vereinfacht dar.

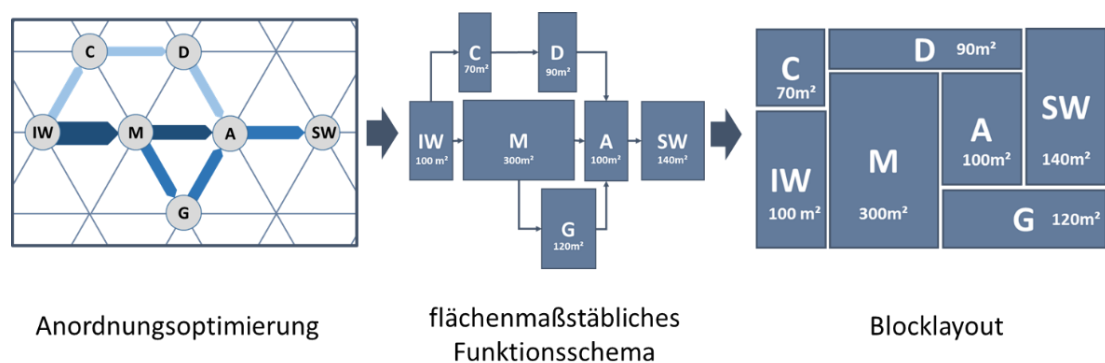


**Abbildung 13: Anordnungsplanung mittels Dreieckverfahren**



Mittels der Transportmatrix<sup>5</sup> wird im ersten Schritt des Verfahrens die stärkste Transportbeziehung zwischen zwei Objekten ermittelt. Dieses Objektpaar wird auf den Knotenpunkten des Dreiecksrasters platziert und bildet die Anfangszuordnung. In den weiteren Schritten werden sukzessive die Objekte angeordnet, die zu den bereits im Raster befindlichen Objekten die höchste Transportintensität besitzen. Dabei wird stets der Rasterpunkt belegt, der die kürzeste Verbindung der Objekte ermöglicht und somit den Transportaufwand am wenigsten erhöht (Grundig 2015, S. 165; Bogatzki 1998, S. 81).

Das Dreiecksverfahren kann auch ohne Rechnerunterstützung durchgeführt werden (Schmigalla 1995, S. 127, 1968, S. 120). Die Endanordnung beinhaltet noch keine Flächenbedarfe oder die genaue räumliche Positionierung (Allgayer 1999, S. 38). Das Verfahren liefert also eine transportoptimierte (mengenmaßstäbliche) Anordnungslösung, die eine Grundlage zur Planung eines Ideallayouts darstellt. Die nachfolgende **Abbildung 14** stellt den Ablauf zur Überführung der Anordnungslösung in ein ideales Blocklayout dar.



**Abbildung 14: Von der Anordnungsoptimierung zum Blocklayout**

Gemeinsam mit den Ergebnissen der Flächenermittlung bzw. Dimensionierung lässt sich die Anordnungslösung in ein flächenmaßstäbliches Funktionsschema überführen, welches die ideale Zuordnung der Objekte und deren Flächenbedarf darstellt. Bei der Übertragung in ein Blocklayout (Ideallayout) werden die Objekte gemäß den idealen Abläufen und der optimierten Anordnung in einer rechteckigen Grundfläche eingeplant (Schenk et al. 2014, S. 341; Kettner et al. 2010, S. 21–23; Arnold et al. 2008, S. 317–319; Allgayer 1999, S. 38–39). Die späte Berücksichtigung der Flächen kann jedoch dazu führen, dass die optimierte Anordnung vom tatsächlichen Optimum abweicht.

<sup>5</sup> Die Transportmatrix wird teilweise auch als „von-nach Matrix“ oder auch als Transportintensitätsmatrix bezeichnet.



## Verbesserungsverfahren

Verbesserungsverfahren gehen von einer Basisanordnung aus, für die zunächst eine Wertsumme aufgrund einzelner Merkmale bestimmt wird. Darauf basierend werden Objekte vertauscht und in gleicher Weise bewertet. Verbessert sich der Zielwert, wird die neue Anordnung beibehalten, andernfalls wird die Vertauschung nicht durchgeführt. Die Verbesserungsschritte werden solange durchlaufen, bis der Zielwert nicht mehr optimiert werden kann (Tiedtke 2007, S. 456; Kusiak und Heragu 1987, S. 240; Merker 1998, S. 30). Die Qualität der Verbesserungslösung steht in Zusammenhang mit der Initiallösung (Kusiak und Heragu 1987, S. 240).

Eines der ältesten (rechnergestützten) Verbesserungsverfahren in der Layoutplanung ist **CRAFT** (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique), das erstmals 1963 von Armour und Buffa vorgestellt wurde (Bölte 1994, S. 110; Armour und Buffa 1963, S. 294–300). Ziel des CRAFT-Verfahrens ist die Reduzierung des Transportaufwandes durch die paarweise Vertauschung von Flächen, wobei die Endanordnung nicht zwangsläufig ein Optimum darstellt. Neben einer Anfangslösung werden auch die Transportintensitäten als Eingangsgrößen<sup>6</sup> benötigt (Arnold und Furmans 2009, S. 295; Wäscher 1982, S. 182–185). Aufgrund der weiten Verbreitung wurde dieses Verfahren stetig weiterentwickelt, da die Anordnung von unterschiedlich großen Flächen und eine limitierte Problemgröße den Einsatz einschränken (Kusiak und Heragu 1987, S. 240; Bölte 1994, S. 110–111). Der ursprüngliche CRAFT-Algorithmus folgt einem rein deterministischen Ablauf und führt daher für jede betrachtete Anfangslösung zu genau einem Ergebnis. Stochastische Ansätze umgehen dieses Problem und ermöglichen die Erzeugung verschiedener Ergebnisvarianten (Bölte 1994, S. 111). Durch Heuristiken lassen sich optimierte und zulässige Lösungen ermitteln. Es lässt sich jedoch nicht darauf schließen, ob das globale Optimum erreicht wird.

### 2.2.2.2 Analytische Anordnungsverfahren

Analytische Anordnungsverfahren ermöglichen die Bestimmung einer optimalen Lösung durch exakte Berechnung (Heiserich et al. 2011, S. 210–211) und zählen daher zu den exakten Verfahren. Diese sind allgemein durch einen hohen Berechnungsaufwand gekennzeichnet und unterliegen einigen Restriktionen (Grundig 2015, S. 164). Analytische Anordnungsverfahren sind in der Lage, das globale Optimum exakt zu bestimmen. Neben den nachfolgend erläuterten

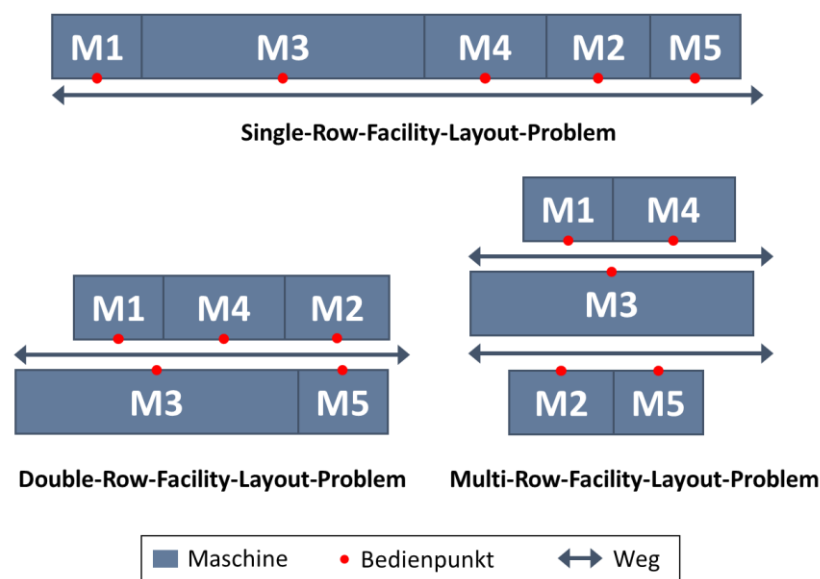
---

<sup>6</sup> Neben der Initialanordnung und den Transportintensitäten zwischen den anzuordnenden Objekten können auch Kosten für die Verlagerung der Objekte einbezogen werden. (Arnold und Furmans 2009, S. 295)

Modellen gibt es noch zahlreiche weitere Verfahren, die ebenfalls den exakten mathematischen Anordnungsverfahren zugeordnet werden können, z.B. Schnittebenen-, Branch and Bound- oder Entscheidungsbaum-Verfahren (Arnold 1998, S. 227; Grundig 2015, S. 164).

Die nachfolgend vorgestellten Lösungsansätze zählen zu den Verfahren der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (Hungerländer 2014b, S. 48). Dabei stellt die hohe Komplexität des Optimierungsproblems und der damit verbundene Rechenaufwand dieser Verfahren bei der Bestimmung einer exakten, optimalen Anordnung von Betriebseinheiten und –Mitteln in einem Layout eine besondere Herausforderung dar. Aus diesem Grund ist es notwendig, Anordnungs- bzw. Planungsprobleme durch geeignete Modelle mit einer entsprechenden Abstraktion für die Optimierungsverfahren handhabbar zu machen.

Beispielsweise erfolgt dies durch die Vorgabe von Wegstrukturen und erlaubten Anordnungsprinzipien, wie in **Abbildung 15** schematisch dargestellt.



**Abbildung 15: Anordnungsprinzip und Wegstrukturen des SRFLP, DRFLP und MRFLP**

Die Optimierungsverfahren des Single-, Double- oder Multi-Row-Facility-Layout-Problems platzieren die anzuordnenden Objekte an den Rändern vorgegebener Wege. Eine optimale Anordnung wird dabei unter dem Zielkriterium der Transportwegminimierung berechnet (Fischer et al. 2015, S. 1587). Teilweise wird auch zusätzlich die Maximierung von closeness-Ratings zwischen den Objekten verwendet (Shouman et al., S. 1). Eine wichtige Nebenbedingung des Optimierungsproblems stellt die überlappungsfreie sowie lückenlose Anordnung von Objekten dar (Anjos et al. 2018, S. 514-515, ; Fischer et al. 2015, S. 1587; Murray et al. 2012, S. 559).

Die Modellierungsansätze der Facility-Layout-Probleme unterscheiden sich unter anderem in der Ausprägung bei den der Anordnungsoptimierung zugrundeliegenden Flächen. In der Literatur finden sich sowohl Ansätze für die Zuordnungsproblematik mit gleichgroßen Flächen bzw. Längen aller anzuordnenden Objekte als auch Ansätze, bei denen sich die Dimensionen der Objekte unterscheiden können (Anjos et al. 2018, S. 514-515; Fischer et al. 2015, S. 1588; Drira et al. 2007, S. 256).

Dennoch sind diese Fabrikplanungsprobleme allgemein als NP-schwer einzustufen (Drira et al. 2007, S. 255; Amaral 2013, S. 407; Anjos et al. 2018, S. 515; Srinivas et al. 2013, S. 35). NP ist die Abkürzung von nichtdeterministisch polynomiell und beschreibt eine Komplexitätsklasse. Es wird davon ausgegangen, dass NP-schwere Probleme nicht in Polynomialzeit<sup>7</sup> berechnet werden können, d.h. sie lassen sich nicht in einer angemessenen Zeit effizient lösen (Korte und Vygen 2008, S. 397–399; Rothe 2008, S. 6; Bracht et al. 2017, S. 201; Krumke und Noltemeier 2009, S. 26; König et al. 2016, S. 285).

### **Das Single-Row-Facility-Layout-Problem**

Das Single-Row-Facility-Layout-Problem<sup>8</sup> (SRFLP) ist ein in der Literatur stark verbreiteter Ansatz bei der mathematischen Beschreibung von Fabrikplanungsproblemen und stellt einen Spezialfall des Grundkonzeptes von Multi-Row-Facility-Layout-Problemen dar (Hungerländer und Anjos 2012, S. 1). Die Objekte werden entlang eines Weges in einer Reihe angeordnet mit der Zielsetzung, die minimal mögliche Summe der gewichteten Distanzen zwischen allen angeordneten Objekten zu erreichen (Hungerländer 2014b, S. 62).

Aktuell beinhaltet die größte exakt gelöste Instanz dieses Problems 42 Objekte. Darüber hinaus lassen sich bis zu 100 Objekte mit sehr guten oberen Schranken in ein nachweislich gutes Single-Row-Layout einplanen (Hungerländer 2013, S. 1260; Hungerländer und Rendl 2012, S. 9). Dieses Verfahren wird auch für die Anordnung von Maschinen in flexiblen Fertigungssystemen adaptiert und von Buscher und Hietschold als Single-Row-Maschinenlayout-Problem (SRMLP) bezeichnet (Siepermann und Eley 2011, S. 180). Die Anordnung von Flächen der gleichen Größe wird Single-Row-Equidistant-Facility-Layout-Problem (SREFLP)

---

<sup>7</sup> Ein Problem gilt in Polynomialzeit als lösbar, wenn die Berechnungszeit der Problemgröße nicht stärker anwächst, als es mit einer Polynomfunktion beschrieben werden kann. (König et al. 2016, S. 326–328)

<sup>8</sup> Das SRFLP wird teilweise auch als eindimensionales space allocation problem bezeichnet. (Hungerländer 2014b, S. 62)

genannt (Hungerländer 2013, S. 1258). Für die einseitige Anordnung an einem geraden Weg kann eine optimale Lösung bestimmt werden. Die Lösungsmodelle sind gleichermaßen für die Optimierung des SRFLP und des SREFLP geeignet. (Hungerländer 2013, S. 1265; Anjos et al. 2018, S. 515) Die dabei entstehenden Anordnungen sind lückenlos, d.h. es liegen keine ungenutzten Freiräume zwischen den angeordneten Objekten vor.

### Double-Row-Facility-Layout-Problem

Das Double-Row-Facility-Layout-Problem (DRFLP) sieht, im Gegensatz zum SRFLP, die Anordnung der Objekte beidseitig entlang eines Weges vor. Das DRFLP stellt eine Erweiterung des SRFLP und somit einen weiteren Spezialfall des MRFLP dar, der bislang in der Literatur nur wenig bearbeitet wurde, aber dennoch für die Praxis relevante Anwendungsmöglichkeiten bietet (Hungerländer und Anjos 2012, S. 1–2; Hungerländer 2014b, S. 181). Das DRFLP lässt sich mathematisch folgendermaßen beschreiben:

Gegeben ist eine Menge von Objekten bzw. Maschinen  $N = \{1; \dots; n\}$  mit den Längen  $l_i, i \in N$ , sowie den paarweisen Transportaufwänden  $c_{ij}$  die zwischen den Objekten vorliegen. Dabei gilt folgende Annahme:

$$c_{ij} = c_{ji} \text{ für } i, j \in N, i \neq j$$

Durch diese Annahme wird beschrieben, dass der Transportaufwand zwischen zwei Objekten ungerichtet ist, d.h. dass der Transportaufwand zwischen zwei Objekten unabhängig von der Flussrichtung ist. Da keine Richtungsentscheidung vorliegt, werden die Werte über eine Summe verknüpft. Die Objekte erhalten eine Position  $p$  und werden einer der zwei Reihen zugeordnet. Die Zielfunktion des Optimierungsproblems lässt sich folgendermaßen formulieren:

$$\min \sum_{i,j \in N, i \neq j} c_{ij} |p(i) - p(j)|$$

Es gilt die Nebenbedingung, dass die Objekte überlappungsfrei angeordnet werden:

$$|p(i) - p(j)| \geq \frac{l_i + l_j}{2}, \text{ für } i, j \in N, i \neq j, \text{ wenn } r(i) = r(j)$$

Das Ziel ist eine Anordnung zu finden, bei der die durch den Transportaufwand gewichtete Summe der Entfernungen zwischen den Flächenschwerpunkten der

Objekte minimal wird und die Objekte links und rechts entlang eines Weges angeordnet werden.

Die Nebenbedingung gewährleistet dabei die überlappungsfreie Anordnung der Objekte innerhalb einer Reihe  $r \in \{1, 2\}$  dadurch, dass der Abstand der Positionen der mittig liegenden Bedienpunkte  $p(i)$  und  $p(j)$  größer oder mindestens genauso groß wie die halbe Breite beider Objekte ist.

Die bislang größte exakt berechnete Optimierungslösung des DRFLP liegt bei 16 Objekten (Anjos et al. 2018, S. 515; Fischer et al. 2015, S. 1587). In einem Anwendungsbeispiel im Rahmen des SWZ-Forschungsprojektes<sup>9</sup> „Anforderungsrobuste Anordnung von Betriebseinheiten und Maschinen durch Kombination von Optimierung und Simulation“ konnte die Anzahl der optimal angeordneten Objekte auf 21 gesteigert werden ((Bracht et al. 2018a, S. 53–54)). In dem Planungsproblem waren vereinzelt Maschinen des gleichen Typs anzuordnen. Unter der Annahme, dass sich die Transporte gleichmäßig auf alle Maschinen eines Typs aufteilen, ergeben sich Symmetrien im Lösungsraum. D.h. es liegen mehrere gleichwertige Lösungen vor. Es werden systematischen mehrere gleiche Anordnungslösungen ausgeschlossen, sodass eine optimale Lösung erhalten bleibt. Dadurch wurde der Lösungsraum effizient eingeschränkt und eine exakte Bestimmung der optimalen Anordnung ermöglicht.

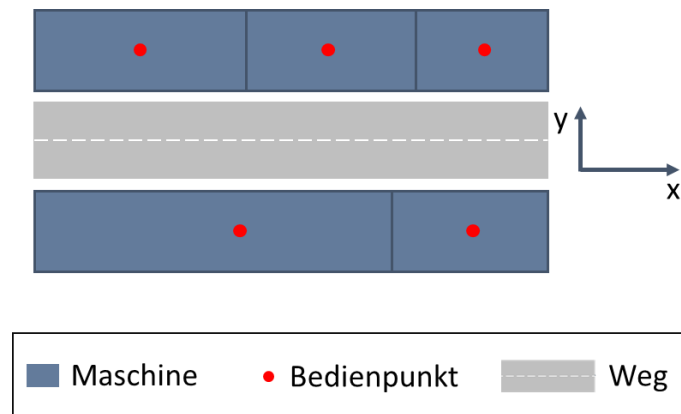
Das DRFLP-Verfahren lässt zudem die Einbindung von Strukturierungskriterien, wie z.B. die Vorgabe von Wareneingangs- und -ausgangslagern zu. Für dieses Anordnungsverfahren wurden von Bracht, Fischer und Krüger im Rahmen des SWZ-geförderten Forschungsprojektes Entwicklungsziele erarbeitet, um die DRFLP-Modelle für reale Fabrikplanungsaufgaben besser nutzen zu können. Die Erweiterungsaspekte lassen sich einerseits in allgemeine und übergeordnete Aspekte und andererseits nach dem Detaillierungsgrad der Planung (Grob- und Feinplanung) unterscheiden. Die angestrebten Erweiterungen des DRFLP beinhalten nach (Fischer et al. 2017, S. 201–202) folgende Zielsetzungen:

### **Allgemeine und übergeordnete Erweiterungen**

Im aktuellen Stand der Technik werden bei der Wegberechnung ausschließlich die horizontalen Entfernungen (x-Richtung) berücksichtigt (**Abbildung 16**).

---

<sup>9</sup> Das SWZ ist das Simulationswissenschaftliche Zentrum der TU-Clausthal und der Georg-August-Universität Göttingen



**Abbildung 16: Transportrichtungen und Bedienpunkte im DRFLP-Modell**

Ein Ziel ist daher die Erweiterung der Wegberechnung um die vertikalen Distanzen (y-Richtung). Damit verbunden sind folgende Aspekte:

- Berücksichtigung der realen Be- und Entladepunkte der Objekte (derzeit wird der Flächenschwerpunkt angenommen)
- Vorgabe von zulässigen Flächen für die Anordnung bzw. Ermittlung einer Anordnungslösung mit minimalem Flächenbedarf
- Bestimmung robuster Layouts bei schwankenden Transportintensitäten

### **Erweiterungen für die Grobplanung**

- Vorgabe von Grundrissen, Grundstücken oder Gebäuden innerhalb der eine Anordnung der Objekte zulässig ist. Dabei sollen weitere Faktoren, wie z.B. zulässige Flächenlasten integriert werden.
- Berücksichtigung von komplexeren Wegestrukturen (z.B. kreuz- oder U-förmig)

### **Erweiterungen für die Feinplanung**

- Einbindung von Nachbarschaftsrestriktionen, die aufgrund des Immissionsschutzes, der Anbindung an gleiche Medienversorgungen, der Mehrmaschinenbedienung etc. entstehen können.
- Erfassung der für benachbarte Betriebsmittel erforderlichen Mindestabstände. Derzeit wird ein pauschaler Mindestabstand berechnet, dieser kann aber durch gewisse Anforderungen bei der Kombination von Betriebsmitteln von der Realität abweichen.
- Effizienter Einsatz von Transportmitteln durch die Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren, die zeit- oder kostenintensive Transportbeziehungen repräsentieren.

Die Einbindung von weiteren, das Planungsproblem repräsentierenden, Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem schränkt den Lösungsraum ein und kann helfen, die Berechnungszeit zu senken (Bracht et al. 2017, S. 201). Darüber hinaus wird das Einsatzpotential für die Planung weiter verstärkt. Besonders die Steigerung der Anzahl der anzuordnenden Objekte in Verbindung mit einer verringerten Rechenzeit stellt einen wichtigen Faktor dar.

### **Multi-Row-Facility-Layout Problem – MRFLP**

Eine Anordnung der Objekte in mehr als zwei Reihen wird als Multi-Row-Layout bezeichnet (Siepermann und Eley 2011, S. 182). Das MRFLP wird zur Anordnung von Funktionseinheiten entlang von zwei oder mehreren parallelen Wegen verwendet (Hungerländer 2014b, S. 181–182). Besonders für die Layoutplanung von flexiblen Fertigungssystemen wird der Multi-Row-Ansatz verwendet (Fischer et al. 2015, S. 1588; Hungerländer 2014b, S. 181, 2014a, S. 2). Für das MRFLP existieren zahlreiche Modellierungs- und Berechnungsansätze, die in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden.

### **Exkurs**

Allgemein können Verfahren zur Anordnungsoptimierung neben der Fabrikplanung auch in weiteren Bereichen, beispielsweise bei der Gestaltung von elektronischen Bauteilen, eingesetzt werden. Die Planung und Optimierung von integrierten Schaltkreisen und VLSI<sup>10</sup>-Chips ist ein wichtiges Anwendungsgebiet, da hier die Minimierung der Verbindungsdistancen durch eine optimale Anordnung der Komponenten zur Steigerung der Leistung und Effizienz beiträgt (Hungerländer 2014a, S. 1; Bachem et al. 1995, S. 237–238). Eine Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Unterstützung der Layoutplanung wird auch für diese Anwendungsbereiche weiterhin von großem Interesse sein (Sarkar et al. 2016, S. 301; Klar und Noll 2015, S. 5).

## **2.3 Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik**

In diesem Kapitel werden Grundlagen zu den in der Gesamtmethodik eingesetzten Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik dargestellt. Zunächst erfolgt eine Einführung in die Digitale Fabrik. Es wird insbesondere auf die Simulationsmethoden eingegangen, da sie eine wesentliche Grundlage für die

---

<sup>10</sup> VLSI steht für very large scale integration und beschreibt die logische Komplexität eines Schaltkreises. (Sarkar et al. 2016, S. 1–2)

Entwicklung der Gesamtmethodik darstellen. Darüber hinaus werden weitere Methoden, wie Virtual Reality, und Werkzeuge, wie der Planungstisch, vorgestellt.

Allgemein müssen Fabrikplanungsaufgaben durch geeignete Planungsmethoden und Werkzeuge unterstützt werden (Schuh 2014, S. 191; Silcher et al. 2015, S. 96). Die übergeordnete Zielsetzung der Fabrikplanung kann als „[...] Gestaltung innovativer, effizienter und realisierbarer Produktions- und Logistiksysteme [...]“ (Dickmann 2007, S. 236–237) zusammengefasst werden, wobei die steigende Komplexität der Planungsaufgaben und große Datenmengen die Verwendung von EDV gestützten Planungswerkzeugen unumgänglich machen. Diese Anforderungen werden im Konzept der Digitalen Fabrik aufgegriffen, die sich nach der VDI-Richtlinie 4499 wie folgt definiert:

*„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung - die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*

*Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ (VDI-Richtlinie 4499, S. 3)*

Aus dieser Definition wird deutlich, dass die Simulation und 3D-Visualisierung wesentliche Elemente für die Fabrikplanung darstellen. Insbesondere die Evaluierung und die laufende Verbesserung der Layoutplanung hinsichtlich der damit verbundenen Effizienz im laufenden Betrieb sollen in dieser Arbeit mit Hilfe von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik (insbesondere der Materialflusssimulation) und mathematischen Optimierungsmethoden erreicht werden. Im weiteren Verlauf werden daher die für die vorliegende Arbeit relevanten Methoden sowie der Nutzen der Digitalen Fabrik beschrieben.

Der konsequente Einsatz von Werkzeugen und Methoden der Digitalen Fabrik führt zu einem Frontloading, also einer Verlagerung des Aufwandes in frühe Planungsphasen, wodurch sich im weiteren Planungsverlauf erhebliche Vorteile bei der Ergebnisqualität sowie der weiteren Nutzung von Ergebnissen und Daten im Rahmen einer kontinuierlichen Planung ergeben (Bracht und Reichert 2010, S. 67). Frontloading ist, auch in Bezug auf Lean Development<sup>11</sup>, ein wichtiger Aspekt, um durch eine frühe und umfassende Planung Fehler und Änderungsschleifen in nachgelagerten Planungsschritten zu vermeiden

---

<sup>11</sup> Lean Development: Integration von Lean-Prinzipien in den Entwicklungs- und Produktentstehungsprozess



(Dombrowski 2015, S. 116). Nach Spillner 2012 hat sich die Digitale Fabrik in zahlreichen Planungsaufgaben durchgesetzt und etabliert, dennoch sollte der Einsatz auf frühere Planungsphasen ausgeweitet werden, um durch ein verstärktes Frontloading die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik in nachgelagerten Planungsphasen durchgehender nutzen zu können (Spillner 2012, S. 65).

Es gilt, geeignete Methoden und Werkzeuge während der Planung zu verwenden, um die Bewältigung der Aufgaben zu unterstützen und zu verbessern (Bracht et al. 2018b, S. 62; Schraft et al. 2003, S. 317). Die für diese Arbeit relevanten Methoden und Werkzeuge werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

### 2.3.1 Virtual Reality

Virtual Reality lässt sich den Visualisierungsmethoden der Digitalen Fabrik zuordnen (Bracht et al. 2018b, S. 88). Der VDI gibt dafür in der Richtlinie 3633 folgende Definition:

*„Die Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren. Als Teil der computergenerierten Welt kann man diese von verschiedenen Positionen aus betrachten und sie unmittelbar verändern.“* (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 11, S. 3)

Der Einsatz von Virtual Reality in der Layoutplanung hilft, die Planungssicherheit durch die realistische Visualisierung der Planung zu steigern (Bracht und Fahlbusch 2001, S. 20) und ermöglicht es während einer virtuellen Begehung (z.B. von Produktionsbereichen) immersive<sup>12</sup> Eindrücke über die räumliche Gestaltung und die geplanten Arbeitsbedingungen zu sammeln (Bracht et al. 2018b, S. 145).

Die virtuellen Begehungen werden beispielsweise durch VR-Labore bzw. Großprojektionsanlagen ermöglicht. Sie bieten für die Absicherung der Planungsergebnisse beste Voraussetzungen, werden allerdings durch den hohen Investitionsaufwand und Platzbedarf nur in sehr spezialisierten Planungsabteilungen eingesetzt.

Aufgrund der gesteigerten Leistungsfähigkeit von VR-Brillen können diese ebenfalls für in der Fabrikplanung eingesetzt werden (Bracht und Schlegel 2018, S. 251–252). Die Investitionskosten für VR-Brillen fallen im Vergleich zu

---

<sup>12</sup> Immersion beschreibt die Wahrnehmung eines Anwenders in die virtuelle Welt einzutauchen und mit ihr interagieren zu können (Bracht et al. 2018b, S. 145). Die virtuelle Welt wird dann als real wahrgenommen.

Großprojektionen gering aus. Wenn jedoch mehrere Planungsteilnehmer gleichzeitig mit den Brillen in die virtuelle Welt eintauchen, ist eine einfache Kommunikation wie im VR-Labor nicht gegeben.

### 2.3.2 Digitale, partizipative Layoutplanung

Unter den derzeit vorherrschenden Rahmenbedingungen steigt der Fabrikplanungsaufwand, sodass Planungsaufgaben kontinuierlich anfallen und sich die Planungszyklen verkürzen (Dombrowski und Riechel 2010, S. 1091; Dombrowski et al. 2005, S. 391–392). Es gilt das Fachpersonal, das zwar nicht über tiefergehendes Wissen zur Fabrikplanung jedoch über wichtiges Fachwissen aus planungsrelevanten Bereichen verfügt, in einen strukturierten Planungsprozess einzubinden und durch Werkzeuge und Methoden zu unterstützen (Dombrowski und Riechel 2010, S. 1091).

Im Rahmen der partizipativen Layoutplanung bietet sich dafür der Einsatz von Planungstischen an. **Abbildung 17** stellt unterschiedliche Umsetzungsvarianten von Planungstischen exemplarisch dar.



**Abbildung 17: Planungstisch – Umsetzungsvarianten in Anlehnung an (Brosch 2014, S. 29; ASSTEC Assembly Technology GmbH & Co. KG 2018)**

Projektionsbasierte Lösungen, wie der Build-IT Planungstisch arbeiten mit einer Projektion des Layouts auf einem Tisch (Topview). Ein kamerabasiertes Trackingsystem erfasst dabei Layoutveränderungen, die durch Verschiebung der Marker auf dem Tisch vorgenommen werden. Zusätzlich wird über eine zweite Projektion oder ein Display ein 3D-Layout angezeigt (Westkämper 2000, S. 94).

Bei der touchfähigen Umsetzung eines Planungstisches werden Touch-Displays zur Darstellung und Interaktion genutzt. Wie auch bei den projektionsbasierten Lösungen können 3D-Darstellungen des Layouts auf zusätzlichen Displays oder Projektoren angezeigt werden. Zunächst wurden für die Planungstische

Singletouch-Technologien eingesetzt, welche allerdings den Anforderungen der partizipativen Planung nicht vollständig genügen. Neuere Entwicklungen setzen daher auf Multitouch-Displays und Multiuser-Fähigkeit, wodurch mehreren Planungsbeteiligten gleichzeitig die Möglichkeit gegeben wird, mit der Planungssoftware zu arbeiten (Dombrowski und Riechel 2010, S. 1094–1095).

Insbesondere wenn Mitarbeiter ohne Planungserfahrung in den Prozess einbezogen werden sollen, ist eine möglichst einfache Bedienbarkeit der Planungswerkzeuge erforderlich, damit keine Hemmnisse bei der Benutzung und Planung entstehen.

Neue Ansätze ermöglichen es, über 3D-Objekte mit RFID-Tags neue Planungsobjekte und planungsrelevante Informationen in ein Modell zu laden. Die 3D-Objekte werden auf dem Planungstisch platziert und sollen die Interaktion weiter verbessern und noch intuitiver gestalten. Die zentral abgelegten Informationen, die mit den Tags verbunden sind, unterstützen die Nutzung der stets aktuellen Daten und sollen durch die Einblendung von Vorgaben und Regelungen den Anwender im Planungsprozess unterstützen (Dombrowski 2017, S. 22–23).

Allerdings ist dafür ein großer Vorbereitungsaufwand erforderlich, der gegenüber dem Nutzen abzuwägen ist. Darüber hinaus ist es bei umfangreicheren Planungsaufgaben zu überprüfen, ob die Platzierung vieler 3D-Objekte auf dem Planungstisch die Übersichtlichkeit negativ beeinflusst.

Planungstische werden als nützliches Werkzeug der digitalen Fabrikplanung beschrieben, um die partizipative Planung zu unterstützen und die Planungsqualität zu steigern. Insbesondere die gemeinsame Kommunikationsgrundlage, die durch den Einsatz des Planungstisches und der 3D-Visualisierung erreicht wird, soll dabei die Zusammenarbeit fördern (Schenk et al. 2014, S. 241). Dies gilt neben den interdisziplinären Planungsteams auch für die Einbindung von Betroffenen (z.B. Werkern) in den Planungsprozess. Deren Mitarbeit fördert zusätzlich neben der Nutzung des spezifischen Wissens auch die Akzeptanz der Planungslösung. Um die betroffenen Mitarbeiter bei der Produktionslayoutplanung sowohl bei der Neu- als auch der Umplanung in den Prozess einzubinden, ist es erforderlich diese durch entsprechende Hard- und Software zu unterstützen. Die Bedienbarkeit ist dabei so einfach wie möglich zu gestalten, um die Hürden für den aktiven Planungseinsatz zu verringern. Eine durchgängige Nutzung der Modelle mit geeigneten Funktionen zur Bewertung der Layouts ermöglicht den Anwendern einen effektiven Einsatz des Planungstisches auch für Umplanungen, an denen die betroffenen Mitarbeiter beteiligt sind. Im Rahmen der Gesamtmethodik gilt es zu definieren, wie dieses Planungswerkzeug effizient in den Planungsprozess

eingebunden werden kann. Dabei gilt es zu klären in welchen Planungsfällen und unter welchen Voraussetzungen Mitarbeiter mit ihren spezifischen Kenntnissen in die Planung einbezogen werden können (siehe Kapitel 4.6 und 4.7).

Dennoch werden Planungstische häufig nur in spezialisierten Planungsabteilungen eingesetzt, da ähnlich wie bei VR-Geräten ein erhöhter Investitionsaufwand erforderlich ist und eine Einbindung in bestehende Planungssysteme und Softwarelösungen hohen Aufwand erfordert.

### 2.3.3 Simulationsmethoden in der Digitalen Fabrik

Im Folgenden werden zunächst die wesentlichen Begriffe zum Thema Simulation definiert. Anschließend ein Überblick zu den verschiedenen Simulationsmethoden, Anwendungsfeldern sowie Nutzeneffekten gegeben. In der Digitalen Fabrik wird die Simulation als wichtige Methode zur dynamischen Abbildung und Untersuchung komplexer Sachzusammenhänge eingesetzt (Bracht et al. 2018b, S. 117). Der VDI gibt in der Richtlinie 3633 folgende Definition des Simulationsbegriffs:

*„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.*

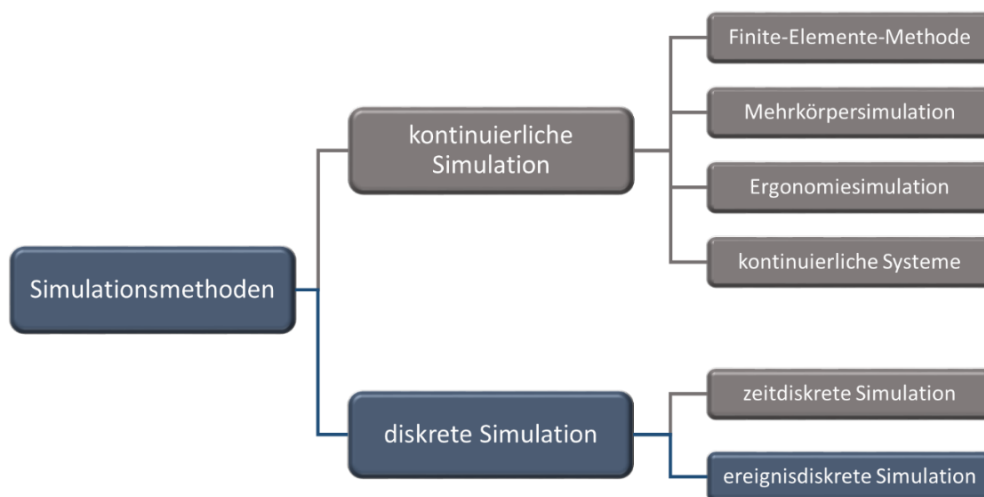
*Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“* (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S.3)

Diese Definition verdeutlicht, dass die Simulation eng mit den Begriffen System und Modell verknüpft ist. Ein System beinhaltet eine Menge an Elementen, die miteinander in Relation stehen und sich gegenseitig beeinflussen (VDI-Richtlinie 3633, S. 4; Eley 2012, S. 3; Kudlich 2000, S. 9). Über die Systemgrenzen werden an den Schnittstellen Ein- und Ausgangsgrößen ausgetauscht (Kudlich 2000, S. 10; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 4).

Unter einem Modell wird eine abstrahierte und vereinfachte Nachbildung eines realen oder geplanten Systems verstanden, dass hinsichtlich seiner untersuchungsrelevanten Eigenschaften erstellt wird (Eley 2012, S. 3–4; VDI-Richtlinie 3633, S. 3; Arnold und Furmans 2009, S. 47). Daher repräsentiert ein Modell das abzubildende System in der Regel nie vollständig und exakt. Während der Modellierung müssen Modellabweichungen vermieden werden, die sich auf die Simulationsergebnisse auswirken und dadurch keine fundierten Rückschlüsse auf das Originalsystem zulassen (Bergmann 2013, S. 11).

Im Rahmen der Digitalen Fabrik werden verschiedene Simulationenmethoden eingesetzt. Diese lassen sich anhand der Repräsentation ihres Zeitverhaltens differenzieren. Speziell die Fortschreibung der Zeit innerhalb des Simulationsmodells wird dabei berücksichtigt (Bracht et al. 2018b, S. 117). Die Erstellung eines Modells erfolgt fallspezifisch (Arnhold 2013, S. 55). Analog dazu ist auch die Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeuges und der zugrundeliegenden Methode nicht als allgemeingültig anzusehen. Die statischen Simulationen, wie z.B. die Monte-Carlo-Simulation (Gleißner und Wolfrum 2019, S. 26), werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

In der nachfolgenden **Abbildung 18** ist die Klassifizierung der dynamischen Simulationenmethoden in der Digitalen Fabrik nach Bracht et al. 2018 zusammenfassend dargestellt.

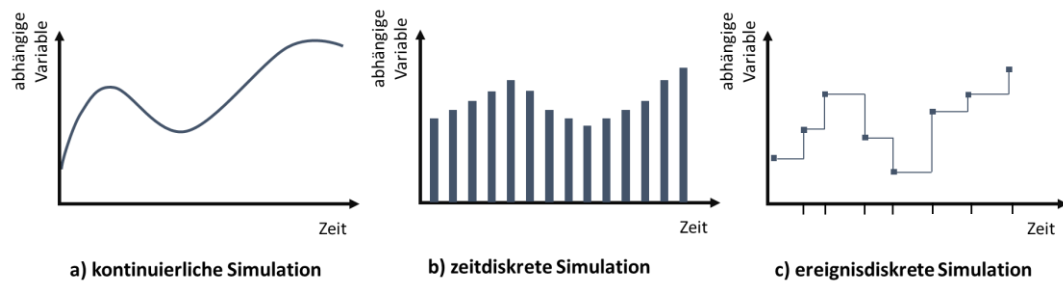


**Abbildung 18: Einteilung der Simulationenmethoden nach ihrer zeitlichen Repräsentation (Bracht et al. 2018b, S. 117–132)**

Die kontinuierlichen Simulationenmethoden sind durch einen konstanten Zeitfortschritt gekennzeichnet. Ein Haupteinsatzgebiet liegt im physikalisch-technischen Bereich (Bracht et al. 2018b, S. 118; Lauer 2013, S. 18).

Die diskreten Simulationenmethoden lassen sich weiterhin in zeitdiskrete und ereignisdiskrete Ansätze unterscheiden. Sowohl die kontinuierlichen als auch die diskreten Methoden können mit stochastischen oder deterministischen Modellen kombiniert werden (Arnhold 2013, S. 58). Die in dieser Arbeit zu betrachtenden Simulationenmethoden sind in der Abbildung 18 blau hervorgehoben.

Um die dargestellte Einteilung näher zu erläutern, wird der Zeitbezug der einzelnen Methoden betrachtet. In der nachfolgenden **Abbildung 19** wird das für die Simulationenmethoden jeweils charakteristische Zeitverhalten dargestellt.



**Abbildung 19: Zeitverhalten der Simulationen in Anlehnung an (Law und Kelton 1991, S. 111; Cassandras und Lafortune 2008, S. 31; Feldmann und Reinhart 2000, S. 19)**

Bei der kontinuierlichen Simulation können die Zeit und die Zustandsvariablen durch stetige Funktionen beschrieben werden (siehe Abbildung 19a). Der zeitdiskrete Ansatz beruht auf einer schrittweisen Erhöhung der Simulationszeit um ein spezifisch festgelegtes Zeitinkrement, das mit  $\Delta t$  bezeichnet wird (Bracht et al. 2018b, S. 127). Alle Zustandsänderungen, die innerhalb des Zeitraumes  $\Delta t$  auftreten, werden bei einer Fortschreibung der Simulationszeit um  $\Delta t$  ausgeführt (siehe Abbildung 19b). Die Wahl des Zeitinkrementes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse und auf die Berechnungsgeschwindigkeit.

Die diskret ereignisorientierte Simulation<sup>13</sup> ist prädestiniert für die Abbildung von Abläufen in Produktions- und Logistiksystemen (Eley 2012, S. 8; Dickmann 2007, S. 238; Bracht et al. 2011, S. 122–123; Feldmann und Reinhart 2000, S. 15; Arnhold 2013; Bracht et al. 2018b, S. 127–128) und wird daher auch Ablauf- bzw. Materialflusssimulation genannt. Hinsichtlich der hohen Relevanz für die vorliegende Arbeit, wird diese Simulationemethode im nachfolgenden Kapitel ausführlicher betrachtet.

## 2.4 Materialflusssimulation

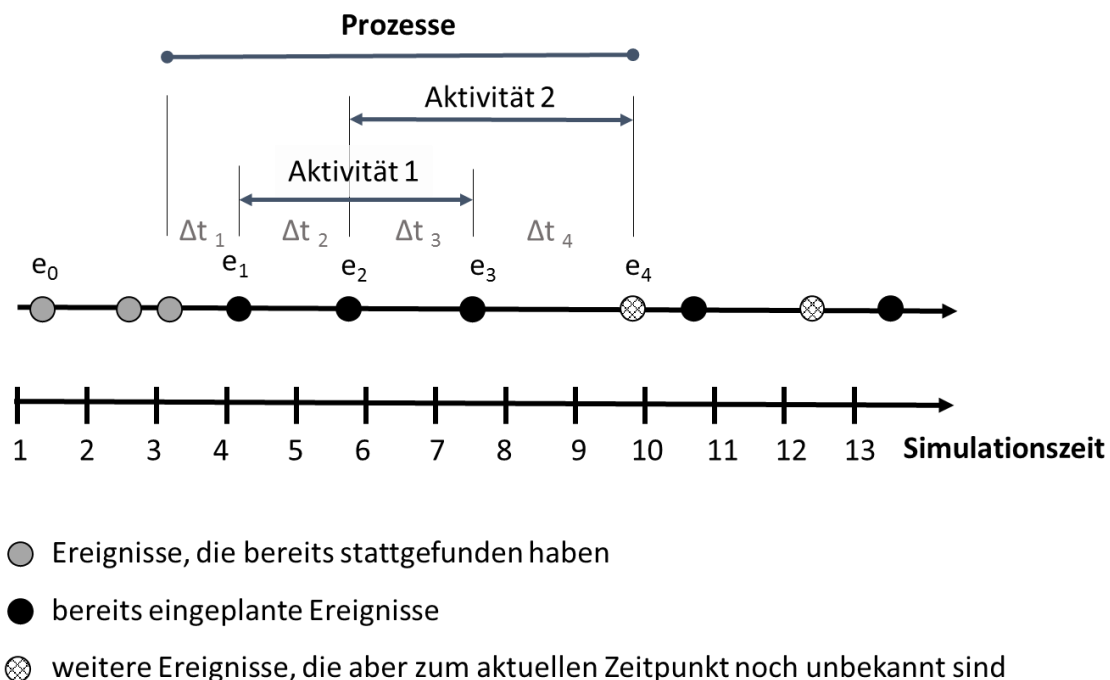
Für die ereignisdiskrete Simulation finden in der deutschsprachigen Literatur häufig auch die Begriffe Ablaufsimulation und Materialflusssimulation (hier liegt der Fokus auf dem Materialfluss) Verwendung (Bracht et al. 2018b, S. 128; Arnhold 2013, S. 58; Bracht und Masurat 2005, S. 364). Wenn in dieser Arbeit Bezug auf die Materialflusssimulation genommen wird, liegt dabei die ereignisdiskrete Ablaufsimulation zugrunde.

<sup>13</sup> Die diskrete ereignisorientierte Simulation wird oft auch mit dem englischen Begriff Discrete-Event-Simulation bezeichnet oder die Kurzform DES verwendet. (Kövari 2011, S. 6)

Bei der ereignisdiskreten Simulation findet nur eine Repräsentation der Zeitpunkte statt, an denen das System eine Zustandsänderung erfährt. Die Veränderung der Systemzustände wird durch atomare Ereignisse ausgelöst, die selbst keine Simulationszeit verbrauchen (Bracht et al. 2018b, S. 128; Robinson 2004, S. 15; Law und Kelton 1991, S. 8; Cassandras und Lafortune 2008, S. 48; Mattern und Mehl 1989, S. 201). Die Systemdynamik wird also durch das asynchrone Auftreten von diskreten Ereignissen charakterisiert (Jeng und Xie 2005, S. 97; Kövari 2011, S. 6).

Während eines Simulationslaufes werden alle Ereignisse in einer Zeitliste, auch Ereignisverwalter genannt, gespeichert. Dabei werden zufallsabhängige Ereignisse dynamisch erzeugt und entsprechend der zugehörigen Simulationszeit in den Ereignisverwalter eingefügt. Wenn die Ereignisliste leer ist, d.h. alle Systemänderungen ausgeführt wurden, oder wenn eine vorgegebene Simulationszeit abgelaufen ist, wird die Simulation beendet (Eley 2012, S. 9). Bereits abgearbeitete Simulationereignisse werden aus der Zeitliste gelöscht.

Die Darstellung von Ereignissen während der Simulationszeit und deren Zuordnung zu Aktivitäten und Prozessen innerhalb eines Modells werden in **Abbildung 20** aufgezeigt.



**Abbildung 20:** Einordnung von Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen während der Simulationszeit in Anlehnung an (Bracht et al. 2018b, S. 129; Eley 2012, S. 8; Mattern und Mehl 1989, S. 201)

Die **Ereignisse** werden über den Zeitverlauf in eine Liste eingetragen und die Dauer bis zum nächsten Ereignis vermerkt ( $\Delta t_i$ ). Dabei verbraucht ein Ereignis selbst keine Simulationszeit. Eine **Aktivität** wird z.B. durch das Starten ( $e_1$ ) und Beenden ( $e_3$ ) eines Arbeitsvorganges abgebildet. Während einer Aktivität können weitere Ereignisse (z.B.  $e_2$  der Start eines weiteren Arbeitsvorganges) eintreten. **Prozesse** werden ebenfalls ereignisgesteuert angestoßen (z.B. durch einen Auftragseingang) und können wiederum mehrere Aktivitäten zur Durchführung umfassen (Eley 2012, S. 8). Der Zustand des Simulationsmodells wird also nur zu diskreten Zeitpunkten, in denen ein Ereignis eintritt, verändert. Im Gegensatz zur zeitdiskreten Simulation ( $\Delta t = \text{konstant}$ ) ergeben sich daraus variierende Dauern für  $\Delta t_i$ .

Ein wesentlicher Vorteil der ereignisdiskreten Simulation liegt darin, dass das Modell nur zu Zeitpunkten betrachtet wird, in denen eine Änderung des Systemzustandes eintritt. Die Softwarewerkzeuge müssen also nur zu diesen Zeitpunkten die Systemvariablen neu berechnen und springen in der Simulationszeit direkt zum nächsten Ereignis. Im Gegensatz zu den kontinuierlichen oder den quasikontinuierlichen Methoden<sup>14</sup> kann dadurch der Rechenaufwand gesenkt bzw. die Berechnungsgeschwindigkeit eines Simulationslaufes deutlich verbessert werden (Arnhold 2013, S. 59; Mattern und Mehl 1989, S. 201–202; Robinson 2004, S. 25). Der Detaillierungsgrad eines Simulationsmodells wirkt sich ebenfalls entscheidend auf die Rechenzeit aus.

Das ablauffähige Simulationsmodell wird während eines Simulationslaufes über einen bestimmten Zeitraum einmal ausgeführt und ermittelt währenddessen untersuchungsrelevante Zustandsgrößen und erstellt statistische Auswertungen (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 4).

Die Anzahl der durchzuführenden Simulationsläufe ist abhängig von den zugrundeliegenden Eingangsgrößen. Bei der Verwendung von deterministischen Größen reicht ein Simulationslauf aus. Werden hingegen stochastische Größen einbezogen, sind mehrere Durchläufe notwendig, um ein belastbares Ergebnis zu erzielen (Eley 2012, S. 4).

Ein Simulationsexperiment umfasst die mehrfache Wiederholung von Simulationsläufen und die gezielte Variation von Parametern, um das Systemverhalten hinsichtlich einer vorgegebenen Fragestellung zu untersuchen

---

<sup>14</sup> Quasi-kontinuierliche Simulation ist eine Ausprägung der zeitdiskreten Methoden, in denen das Zeitinkrement  $\Delta t$ , um das sich die Simulationszeit erhöht, sehr klein gewählt wird (Robinson 2004, S. 25).



(VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 3). Eine Simulationsstudie beginnt mit der Betrachtung der Problemstellung des Ausgangssystems sowie dessen Abstraktion und Vereinfachung, um ein geeignetes Simulationsmodell zu erstellen (Backer und Kopecki 2013, S. 182). Darauf aufbauend werden Experimente durchgeführt und formale Ergebnisse erzielt, die wiederum analysiert und interpretiert werden müssen, damit Rückschlüsse auf das Systemverhalten möglich sind. Dabei können mehrere Varianten durch systematische Veränderung der Eingabewerte simuliert werden und die gewonnenen Erkenntnisse in das Ausgangssystem einfließen.

Die Ein- und Ausgabewerte lassen sich nach (Eley 2012, S. 4) folgendermaßen kategorisieren und beschreiben:

#### **Eingabewerte:**

- **Parameter** sind festgelegte Eingangsgrößen, die nicht verändert werden.
- **Zufallsgrößen** haben keinen festgelegten und beeinflussbaren Wert. Sie sind zufallsabhängig und werden durch statistische bzw. empirische Verteilungen abgebildet.
- **Entscheidungsvariablen** werden in den Simulationsexperimenten so angepasst, dass die Ausgabewerte optimiert werden.

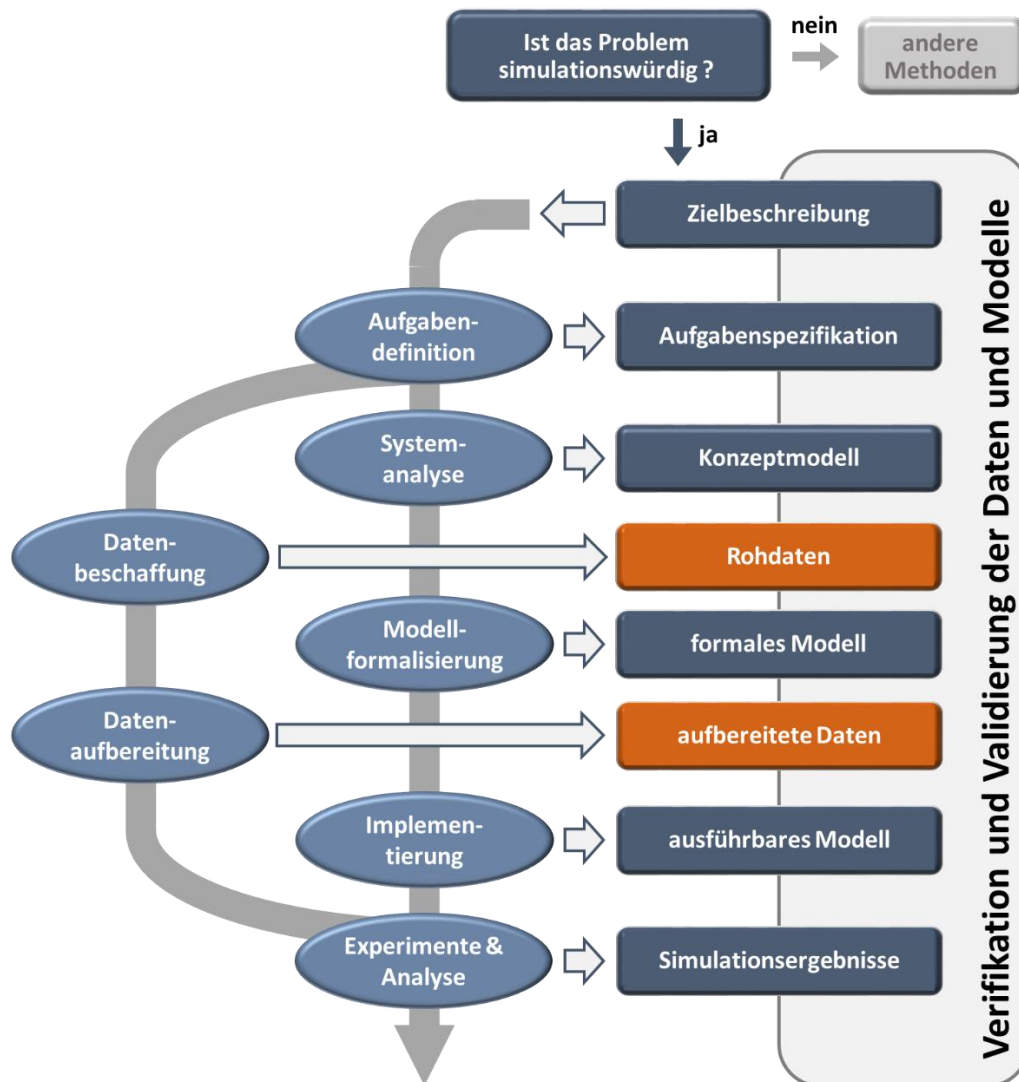
**Ausgabewerte** umfassen Ergebnisgrößen, Zielkriterien und Kennzahlen, mit denen die Leistung des betrachteten Systems ermittelt wird. Ein laufender Abgleich der Simulationseingabe- und -ausgabewerte lässt Schlussfolgerungen über das Systemverhalten zu und unterstützt die Entwicklung von Optimierungsansätzen (Eley 2012, S. 4-5).

#### **2.4.1 Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien**

Häufig werden Simulationsstudien durchgeführt, um wichtige Entscheidungsprozesse zu unterstützen, deren Anforderungen nicht mehr durch verlässliche analytische Methoden erfüllt werden können. Eine wesentliche Voraussetzung bei dem Einsatz von Simulationen ist die Korrektheit und Übertragbarkeit der Ergebnisse (Rabe et al. 2008, S. 1). Im Verlauf einer Simulationsstudie muss daher durchgängig auf Verifikation und Validierung geachtet werden.

Die Verifikation beinhaltet die formale Überprüfung des Simulationsmodells auf Korrektheit und soll sicherstellen, dass bei den Schritten zur Übertragung des realen Systems in das Simulationsmodell keine Verzerrungen auftreten, die z.B. durch fehlerhafte Programmierung möglich sind (VDI-Richtlinie 3633, S. 37; Bethke 2005, S. 68–69).

Die Validierung dient der Überprüfung, ob das Modell das Verhalten des Ausgangssystems genau genug und fehlerlos nachbildet. Die zugrunde liegende Fragestellung der Validierung ist also: Wird die Wirklichkeit bzw. Planung hinreichend genau abgebildet und ist das Modell zur Klärung der Problemstellung geeignet? (VDI-Richtlinie 3633, S. 37; Grundig 2015, S. 256). In **Abbildung 21** wird das Vorgehensmodell einer Simulationsstudie mit der Integration von Verifikation und Validierung dargestellt.



**Abbildung 21:** Vorgehensmodell einer Simulationsstudie in Anlehnung an (Rabe et al. 2008, S. 5; VDI-Richtlinie 3633, S. 19)

Vor Beginn einer Simulationsstudie gilt es, die Simulationswürdigkeit einer Problemstellung zu bewerten (Bracht und Masurat 2005, S. 364). Generell wird ein Problem als simulationswürdig angesehen, wenn keine geeigneten

analytischen Methoden existieren (bzw. diese nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand einzusetzen sind) und weitere der nachfolgend aufgeführten Aspekte nach (Grundig 2015, S. 252–253; VDI-Richtlinie 3633, S. 19–20) zutreffen:

- Der Simulationseinsatz soll wirtschaftlich sein, d.h. der Nutzen von Simulationsstudien muss im Verhältnis zum Aufwand der Durchführung stehen.
- Die Komplexität der Problemstellung erfordert umfassende Analysemöglichkeiten, z.B. dadurch, dass große Datenmengen, viele Relationen und Einflussgrößen oder allgemein eine geringe Überschaubarkeit über die Zusammenhänge vorliegen.
- Es liegen Daten bzw. Datenstrukturen in einer Qualität vor, die auf eine belastbare Ergebnisqualität schließen lässt.
- Die Simulationsergebnisse sollen für die Beweisführung bzw. den Beleg bei der Auswahl von Varianten dienen.
- Das zu erstellende Simulationsmodell kann / soll häufiger genutzt werden.

Wenn die Problemstellung als simulationswürdig gilt, kann das Vorgehensmodell aus **Abbildung 21** weiter durchlaufen werden. Eine wesentliche Eigenschaft dieses Modells ist die Trennung von Modell und Daten. Der Grund dafür liegt in dem hohen Aufwand für die Datenbeschaffung und der simulationsgerechten Aufbereitung. Daher werden die Daten spezifisch und eigenständig in der Verifikation und Validierung behandelt (Rabe et al. 2008, S. 45).

Anhand der Zielbeschreibung werden in der Phase der **Aufgabendefinition** das Zielsystem und die einzelnen Aufgaben festgelegt. In einem Zielsystem lässt sich in der Regel eine übergeordnete Zielsetzung in mehrere Teilziele untergliedern, die sich gegenseitig beeinflussen oder miteinander in Konflikt stehen können (VDI-Richtlinie 3633, S. 21). Das Phasenergebnis ist die **Aufgabenspezifikation** und beschreibt das zu lösende Problem und die dafür einzusetzenden Mittel (Rabe et al. 2008, S. 47). In der nachfolgenden Phase findet die **Systemanalyse** statt. Sie umfasst die Analyse des Untersuchungsobjektes hinsichtlich seiner bestimmenden Merkmale, Wirkungszusammenhänge und problemrelevanten Einflussgrößen (Grundig 2015, S. 253). Es werden die zu modellierenden Elemente und der entsprechende Detaillierungsgrad bestimmt. Eine Abstraktion oder Vernachlässigung von weniger relevanten Aspekten ist nötig, um eine gewisse Effizienz bei der Modellierung zu erreichen. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass das Weglassen von Zusammenhängen zu Modellen führt, die für die

Untersuchungsziele unbrauchbar sind (Rabe et al. 2008, S. 47). Am Ende der Systemanalyse liegt ein noch nicht experimentierbares **Konzeptmodell** vor, das alle in der Simulationssoftware umzusetzenden Umfänge und deren Detaillierungsgrad beschreibt (VDI-Richtlinie 3633, S. 22; Rabe et al. 2008, S. 48).

Auf Basis des Konzeptmodells erfolgt die **Modellformalisierung**. Während der Formalisierung bedarf es teilweise weiterer Annahmen und Vereinfachungen, die dokumentiert und mit allen Projektbeteiligten besprochen werden müssen (Rabe et al. 2008, S. 49). Die Modellformalisierung ist der Grundstein für die Implementierung (VDI-Richtlinie 3633, S. 31). Nach Abschluss dieser Phase liegt ein **formales Modell** vor, das anschließend von Simulations- und Softwareexperten ohne weitere Abstimmungsaufwände umgesetzt werden kann.

Die **Implementierung** ist die Überführung des formalen Modells in ein **ausführbares Modell** (Simulationsmodell), welches das primäre Ziel der Modellerstellung darstellt (Wenzel et al. 2008, S. 7). Implementierung beinhaltet folglich die Umsetzung der zuvor definierten Inhalte und Zusammenhänge in einem Simulationssystem (Software) und ermöglicht die Durchführung von Untersuchungen mit dem experimentierfähigen Modell (VDI-Richtlinie 3633, S. 32; Grundig 2015, S. 255).

Während der Modellbildungsphasen sollten die von (Becker et al. 1995) verfassten Grundsätze der ordnungsmäßigen Modellierung berücksichtigt werden. Diese Grundsätze lassen sich nach (Becker et al. 1995, S. 435–444; Becker, S. 4–7; Rabe et al. 2008, S. 126) folgendermaßen zusammenfassen:

- **Grundsatz der Richtigkeit:** Das Verhalten und die Struktur des Originalsystems muss durch das Modell verzerrungsfrei abgebildet werden (Becker et al. 1995, S. 442; Becker, S. 4).
- **Grundsatz der Relevanz:** Ein Modell kann die Realität nie vollständig und exakt abbilden. Daher ist ein entsprechender Detaillierungsgrad festzulegen, in dem alle untersuchungsrelevanten Systemteile nachmodelliert werden.
- **Grundsatz der Klarheit:** Simulationsmodelle sollen „so einfach wie möglich und nur so kompliziert wie nötig“ (Becker, S. 5) gehalten werden. Wichtige Aspekte dieses Grundsatzes sind die Anschaulichkeit, Verständlichkeit und Lesbarkeit. Die Strukturierung ist nachvollziehbar zu gestalten.

- **Grundsatz der Vergleichbarkeit:** Modelle, die aus unterschiedlichen Modellierungsverfahren hervorgehen, führen zu vergleichbaren Erkenntnissen.
- **Grundsatz des systematischen Aufbaus:** Eine konsistente Vorgehensweise zur Modellierung und Integration verschiedener Aspekte und Sichten (z.B. Datensicht, Funktionssicht) ist notwendig (Becker et al. 1995, S. 439; Becker, S. 7).

Parallel und eng verbunden zu den Modellbildungsphasen findet die Datenbeschaffung und die Datenaufbereitung statt (Wenzel et al. 2008, S. 7). Bei der **Datenbeschaffung** werden die erforderlichen Daten aus der Aufgabenspezifikation und dem Konzeptmodell abgeleitet. Diese müssen dann durch die Fachexperten aus bereits vorliegenden Produktionsdaten (z.B. Systemlast-, Organisations- oder technische Daten) oder Planungsdaten bereitgestellt werden (Rabe et al. 2008, S. 51–52; VDI-Richtlinie 3633, S. 33–34). Das Ergebnis der Datenbeschaffung sind die **Rohdaten**, die im Zuge der **Datenaufbereitung** in eine für das Simulationsmodell nutzbare Form gebracht werden. Dies geschieht unter anderem durch Filterung oder Transformation der Daten in bestimmte Formate. Zudem können statistische Verteilungen aus den vorliegenden Daten erzeugt werden, die durch das Modell abgebildet werden sollen (Rabe et al. 2008, S. 52). Aufgrund des hohen Einflusses der Datenqualität auf die Aussagekraft und die Qualität der Simulationsergebnisse ist die Validierung der Rohdaten und der aufbereiteten Daten von besonderer Bedeutung (orange hervorgehoben in Abbildung 21).

Das ausführbare Modell wird zusammen mit den aufbereiteten Daten zur Durchführung von **Experimenten und Analysen** genutzt. Dafür müssen zunächst Hypothesen über das System und Experimentpläne bestimmt werden. Dementsprechend werden Experimente mit mehreren Simulationsläufen und systematischer Variation der Parameter durchgeführt und dokumentiert. Die dabei ermittelten **Simulationsergebnisse** müssen analysiert und interpretiert werden, um Schlussfolgerungen und Maßnahmen für das System ableiten zu können (Rabe et al. 2008, S. 50–51; VDI-Richtlinie 3633, S. 35–36; Wenzel et al. 2008, S. 8; Bracht und Masurat 2005, S. 365).

Begleitend zu allen Phasen und Phasenergebnissen findet die Verifikation und Validierung statt. Nach (Wenzel et al. 2008, S. 8; Rabe et al. 2008, S. 51) ist das Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie nicht als schrittweiser Durchlauf der Phasen zu verstehen, sondern vielmehr als Entwicklungsrichtung mit iterativen Prozessen zur Erreichung des Gesamtzieles. Der iterative Charakter wird dabei durch den Einsatz von Verifikation und Validierung geschaffen.

Weichen (Teil-) Ergebnisse in ihrer Richtigkeit und Vollständigkeit von den Umsetzungen und Anforderungen der vorausgegangenen Planungsphasen ab, sind „Rücksprünge zu vorherigen Planungsphasen notwendig“ (Wenzel et al. 2008, S. 8).

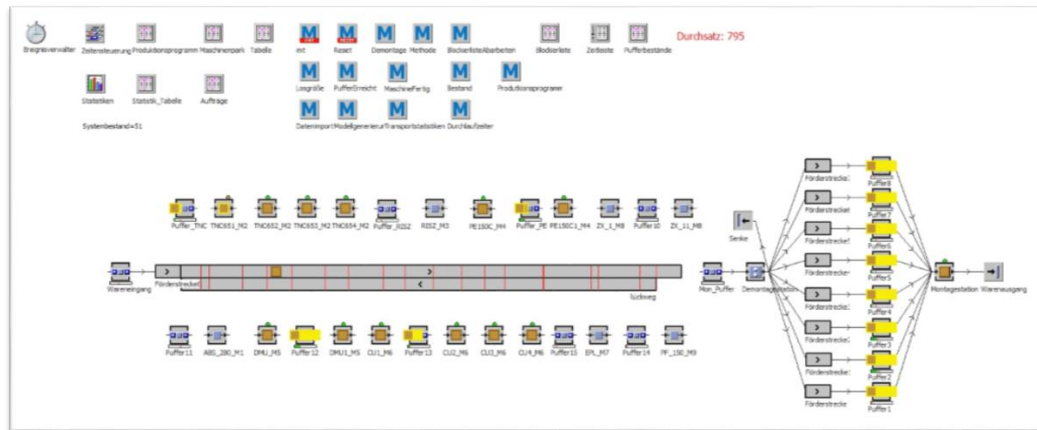
Für die Durchführung von Simulationsprojekten gibt es eine Erweiterung des zuvor erläuterten Vorgehensmodells. Der Fokus liegt dabei auf der Unterstützung einer systematischen Projektdurchführung und der Qualitätssicherung. Zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen werden mittels Checklisten Handlungsempfehlungen für die Auftraggeber und –nehmer gegeben, die in allen zuvor erläuterten Phasen und auch Vorphasen angewendet werden sollen. Eine vertiefende Beschreibung der Erweiterung und Checklisten erfolgt in (Wenzel et al. 2008, Kapitel 2.5).

#### **2.4.2 Visualisierung und Animation in der Simulation**

Die Darstellung des Simulationsmodells und der Abläufe spielt eine wichtige Rolle für die Transparenz und Verständlichkeit für Anwender und Planungsbeteiligte. Der Grundsatz der Klarheit für die ordnungsmäßige Modellierung lässt sich auch auf softwaremäßige Umsetzung übertragen. Aktuelle Simulationswerkzeuge ermöglichen die Verwendung von 2D- oder 3D-Visualisierungen und Animationen (Bracht et al. 2018b, S. 130; Eley 2012, S. 10).

In den frühen Entwicklungsphasen der Simulation wurde das Potential von Animationen zur zeitdynamischen Visualisierung durch die Befürchtung, dass diese vom eigentlichen Fokus der Untersuchung ablenken können, übertroffen (Schmitz und Wenzel 2013, S. 373). Im Bereich Produktion und Logistik ist die graphische 2D- und 3D-Darstellung von Abläufen fester Bestandteil von Simulationsprojekten (Strassburger et al. 2005, S. 1949).

In der nachfolgenden **Abbildung 22** und **Abbildung 23** sind beispielhaft die Visualisierungsmöglichkeiten der Software Plant Simulation dargestellt.



**Abbildung 22: 2D-Darstellung eines Simulationsmodells in Plant Simulation**



**Abbildung 23: 3D-Visualisierung eines Simulationsmodells zur Layoutanalyse in Plant Simulation**

In den Abbildungen werden die 2D- und 3D-Darstellungsmöglichkeiten in Plant Simulation anhand eines Beispielsmodells aus der Layoutplanung aufgezeigt. Aus der standardmäßigen 2D-Ansicht können durch den Import und die Verknüpfung von CAD-Modellen im jt-Format dreidimensionale Simulationsmodelle erzeugt werden. Sowohl in der 2D- als auch in der 3D-Ansicht lassen sich durch die Animation die Zustands- oder Ortsveränderungen von beweglichen Objekten abbilden (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 17). Bei der ereignisdiskreten Simulation können diese Zustands- und Ortsveränderungen (in Abhängigkeit von der Modellierung) in der Animation jedoch als sprunghaft wahrgenommen werden.

Die Animation kann darüber hinaus als Validierungsmethode genutzt werden. Dafür wird das Modellverhalten über einen begrenzten Zeitraum beobachtet und geprüft, ob die Abläufe nachvollziehbar sind und das reale oder das geplante System korrekt nachbilden. Falls in gewissen Zeiträumen keine plausiblen Ergebnisse erzielt werden, kann die Animation sinnvoll eingesetzt werden, um Fehler aufzudecken oder das Verständnis für die Ergebnisse zu fördern (Rabe et

al. 2008, S. 95–97; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 17). Die Beobachtung von Animationen ist allerdings nur über einen begrenzten Zeitraum sinnvoll und muss mit einer entsprechend angepassten Geschwindigkeit erfolgen.

### **2.4.3 Einsatz von Materialflusssimulationen in der Fabrikplanung**

Die Anwendungsgebiete der Simulation lassen sich nach dem Einsatzzeitpunkt unterscheiden. Simulation kommt bereits bei der frühen Planung von Produkten oder den benötigten Fertigungskapazitäten zum Einsatz und wird von (Kuhn und Rabe 1998; Eley 2012, S. 7; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 5–9) bis hin zur operativen Nutzung in drei Phasen eingeteilt sowie folgenden allgemeinen und beispielhaften Anwendungen bzw. Zielsetzungen zugeordnet:

#### **Planungsphase:**

- Planungsabsicherung und Erfahrungsgewinn an noch nicht real existierenden Systemen
- Frühzeitige Erkennung von Fehlern und Ermittlung von Korrekturmöglichkeiten
- Überprüfung der Dimensionierung von Kapazitäten und Anlagenteilen
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen, um Erkenntnisse über die Reaktion des Systems auf schwankende Eingabewerte zu gewinnen

#### **Realisierungs- und Anlaufphase:**

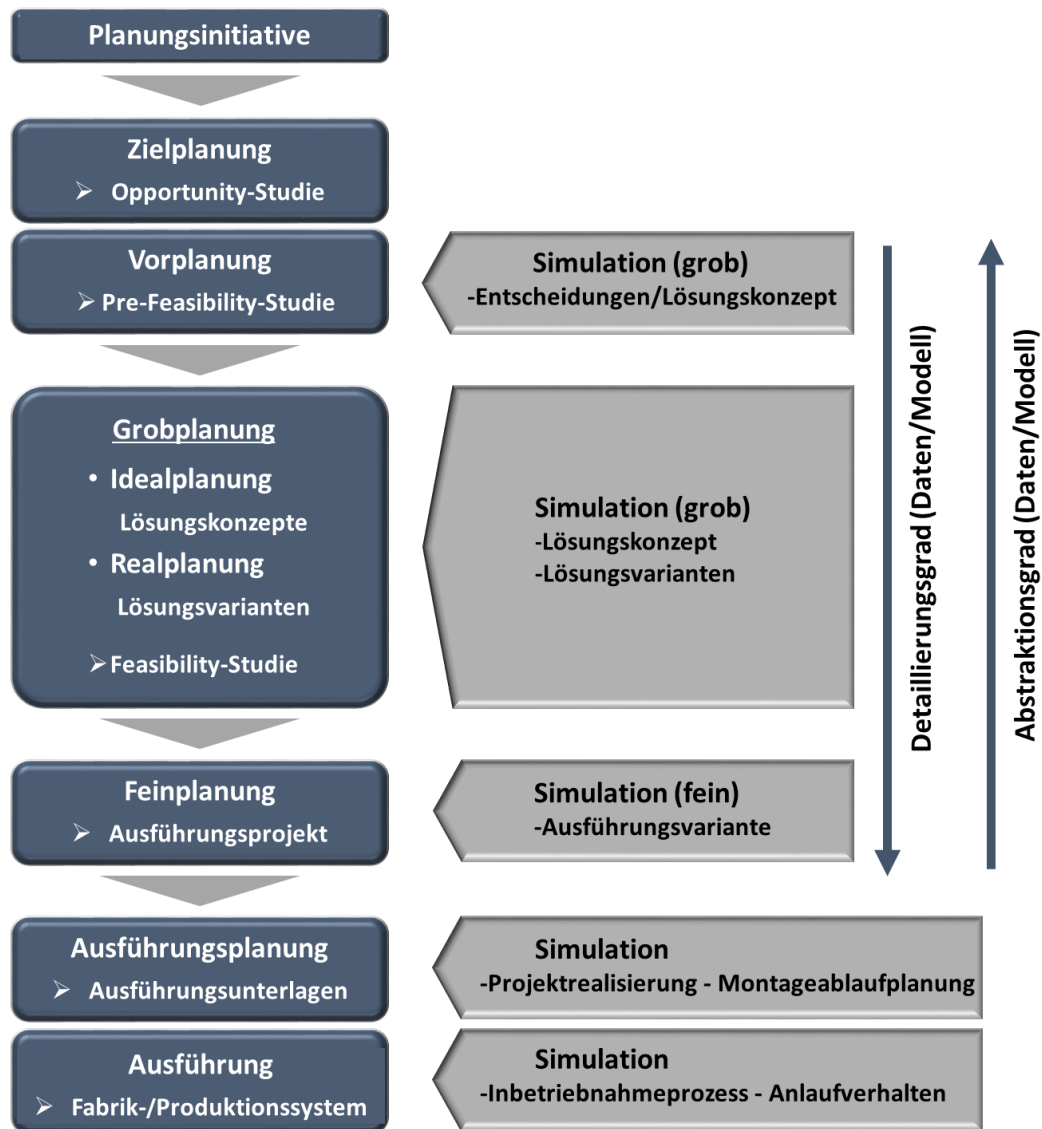
- Ableiten von Strategien, z.B. bei dem Ausfall von Anlagen und Maschinen
- Darstellung von Funktionalität und Zusammenhängen im System
- Virtuelle Inbetriebnahme – Entwicklung und Test von Steuerungssoftware

#### **Betriebsphase:**

- Absicherung der Einlastung von Aufträgen über verfügbare Anlagen und Maschinen
- Untersuchung und Festlegung von Strategien, die während des operativen Betriebes kurzfristig geändert werden können
- Ableitung von Handlungsmöglichkeiten bei komplexen Störungen



Neben dieser allgemeinen Zuordnung der Simulationsanwendungen in die Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase lässt sich nach (Grundig 2015, S. 240) der Simulationseinsatz und der jeweils erforderliche Detaillierungsgrad der Modelle in die Fabrikplanungsphasen zuordnen. **Abbildung 24** stellt diese Einordnung der Simulation in die Fabrikplanungsphasen dar.



**Abbildung 24:** Simulationseinsatz in den Fabrikplanungsphasen in Anlehnung an (Grundig 2015, S. 240)

Im Verlauf des Planungsprozesses steigt der Detaillierungsgrad der Simulationsmodelle analog zu den Ergebnissen der Planungsphasen an. Dabei sinkt der Abstraktionsgrad der Daten und des Modells.

Während der Vorplanung kann die Simulation auf einer groben Detailebene für die Untersuchung grundsätzlicher Fragestellungen, wie z.B. die Bestimmung von Investitionsbedarf oder den Test von Produktionsszenarien, genutzt

werden. Sowohl in der Grobplanung als auch in der Feinplanung werden Simulationen zur Analyse, Auswahl und Optimierung von Layouts durchgeführt (Grundig 2015, S. 241). Der Simulation können dabei u.a. Blocklayouts oder Maschinenaufstellungen zugrunde liegen. Darüber hinaus werden in diesen Phasen auch Dimensionierungsaufgaben, die Analyse des Systemverhaltens, Funktionsnachweise usw. durch Simulation unterstützt. Im weiteren Verlauf der Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Simulation von Anordnungslösungen.

In der Ausführungsplanung können unterschiedliche Realisierungsvarianten simuliert und ausgewertet werden, um so zeit- und kostenoptimale Montageabläufe zu ermitteln (Grundig 2015, S. 242). Begleitend zur Ausführungsphase wird Simulation für die Überprüfung und Verbesserung des Anlaufverhaltens des Produktionssystems eingesetzt (Grundig 2015, S. 242). Darüber hinaus kann eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden, wobei der erforderliche Aufwand stark vom Detaillierungsgrad bzw. der Modellierungstiefe abhängt (Friebe et al. 2015, S. 231).

Entgegen der zuvor dargestellten Klassifizierung von (Kuhn und Rabe 1998; Eley 2012; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1) kann die Einteilung des Detaillierungsgrades der Simulationsmodelle nach (Grundig 2015) sowohl auf die Neuplanung als auch die Umplanung aus der Betriebsphase heraus bezogen werden. Die zu entwickelnde Gesamtmethodik soll sowohl auf die Neuplanung als auch auf die laufende Anpassung und Optimierung der Layouts während des Betriebes ausgerichtet werden. Daher ergibt sich ergänzend zu (Kuhn und Rabe 1998; Eley 2012; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1) in der Realisierungsphase zusätzlich die Aufgabe der Absicherung von Layoutplanungsvarianten.

Die Planungsphasen werden bei einer Neuplanung vollständig (teilweise auch iterativ) durchlaufen. Bei einer Umplanung, die beispielsweise durch geänderte Rahmenbedingungen oder durch die Einführung neuer Produktionstechnologien und -anlagen erforderlich ist, müssen nicht zwangsläufig alle Planungsphasen vollständig durchlaufen werden. Ansätze, wie die „smarte, digitale Layoutplanung“ nach Brosch greifen dies bei der Anpassungs- und Umplanung auf. *„Abweichend vom klassischen Vorgehen fokussiert sich die smarte digitale Layoutplanung, der Aufgabe entsprechend auf die Realplanung, da die Vorteile einer Idealplanung in diesem speziellen Fall nicht ausgeschöpft werden können“* (Brosch 2014, S. 79).

Aufbauend auf den Ausführungen von Brosch (siehe auch Kapitel 2.1.3.2) lässt sich daher der Planungsablauf für die Umplanung vorrangig auf die Realplanung reduzieren. Umplanungen während der Betriebsphase können demnach mit einem

verkürzten Durchlauf der Planungsphasen vorgenommen werden. Für die zu entwickelnde Gesamtmethodik gilt es daher zu überprüfen, ob eine Vereinfachung des Planungsablaufes für Umplanungen möglich ist. Insbesondere hinsichtlich der steigenden Planungshäufigkeit bis hin zu einer kontinuierlichen Planung ist dies anzustreben.

Zudem ist eine durchgängige Nutzung des Simulationsmodells sowohl für die Neu- als auch für die Umplanung sinnvoll, um den Aufwand für den Simulationseinsatz zu reduzieren. Daher ist es erforderlich, bei der Modellbildung hinsichtlich dieser Aufgabenstellungen einen geeigneten Detaillierungsgrad festzulegen.

Für die zu entwickelnde Gesamtmethodik ergibt sich aus der Darstellung von Grundig und anhand der Realplanungsphase ein (noch) grober Detaillierungsgrad für die Simulation z.B. für den Vergleich der Lösungsvarianten.

Neben der Einteilung nach Grundig, wo Simulation zur Layoutgestaltung in den Planungsphasen, insbesondere der Grob- und Feinplanung eingeordnet wird, findet nach (Feldmann und Reinhart 2000, S. 15) eine genaue Zuordnung anhand der einzelnen Planungsebenen statt.<sup>15</sup>

Eine weitere Differenzierung der zugrunde liegenden Simulationsmodelle kann durch die Betrachtung der entsprechenden Planungsebenen vorgenommen werden. Der Simulationseinsatz und die zu verwendenden Simulationsmodelle stehen, wie in **Tabelle 1** aufgeführt, in direktem Zusammenhang mit der Planungsebene und dem Planungsinhalt. Feldmann und Reinhart ordnen die Ablaufsimulation in mittlerer bis feiner Detailtiefe für Layoutplanungen auf Anlagen- oder Zellenebene<sup>16</sup> zu. Ausgehend von der höchsten Ebene, der Fabrikebene, steigt der Detaillierungsgrad der Planungsinhalte und der zugehörigen Simulationsmodelle in den untergeordneten Planungsebenen.

---

<sup>15</sup> Nach Grundig 2015, S. 241 kann Simulation „prinzipiell in allen Planungsgrundfällen, Planungsebenen und Planungsphasen“ eingesetzt werden. Eine genaue Zuordnung der Simulationsmethoden und Fragestellungen wird jedoch nicht vorgenommen.

<sup>16</sup> Unter einer Zelle wird die Zusammenfassung mehrerer Bearbeitungsstationen verstanden, die gemäß den Produktionsabschnitten gegliedert werden können.

**Tabelle 1: Simulationseinsatz in verschiedenen Planungsebenen (Feldmann und Reinhart 2000, S. 15)**

Planungsebene	Planungsinhalt	Simulationsmodell
<b>Fabrik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertigungsprinzip</li> <li>- Logistik</li> <li>- Systemleistung</li> <li>- Einlaststrategien</li> <li>- PPS-Parameter</li> </ul>	Ablaufsimulation (grob) Wirtschaftlichkeitssimulation
<b>Anlage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anlagenlayout</li> <li>- Materialfluss/Logistik</li> <li>- Systemleistung</li> <li>- Fertigungsprinzip</li> <li>- Steuerstrategien</li> <li>- Entstörstrategien</li> </ul>	Ablaufsimulation (mittel)
<b>Zelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zellenlayout</li> <li>- Ablaufvorschriften</li> <li>- NC-Programmierung</li> <li>- Kollisionsvermeidung</li> <li>- Taktzeitoptimierung</li> </ul>	Ablaufsimulation (fein) Graphische 3D-Kinematiksimulation
<b>Komponente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebsmittelbeanspruchung</li> <li>- Prozessparameter</li> <li>- Werkzeuge und Hilfsmittel</li> <li>- NC-Programme</li> </ul>	Finite-Elemente-Methode (FEM) Graphische 3D-Kinematiksimulation Mehrkörpersimulation (MKS)

Der Einsatz von Ablaufsimulation findet häufig auch bei der Untersuchung und Absicherung von Layoutplanungen statt. Daraus wird ersichtlich, dass die Ablaufsimulation bei den typischen Planungsinhalten auf Fabrik-, Anlagen- und Zellenebene eingesetzt wird. Nach Feldmann und Reinhart wird für die zu entwickelnde Gesamtmethodik ein mittlerer Detaillierungsgrad der Modelle festgelegt, da Layouts und Materialflüsse auf Anlagenebene betrachtet werden sollen. Diese Einordnung wird gegenüber der groben Simulation im Rahmen der Realplanung (nach Grundig) bevorzugt, da mit dem höheren Detaillierungsgrad auch eine höhere Aussagekraft der Simulationsergebnisse für die Neu- und die Umplanung zu erwarten ist.

Aufgrund der hohen Eignung der ereignisdiskreten Simulation für die Unterstützung von Layoutplanungsproblemen, soll im weiteren Verlauf der Arbeit die Verbindung von Layoutplanung und Simulation näher betrachtet sowie weiteres Entwicklungspotential aufgezeigt werden.

Abschließend zur Einführung in die ereignisdiskrete Simulation werden kurz deren Vorteile zusammengefasst. Der Einsatz von Ablaufsimulationen in der Planung und Analyse von Produktions- und Logistiksystemen ermöglicht deren Untersuchung ohne Eingriff in den operativen Betrieb, den Test unterschiedlicher Betriebsstrategien und hilft, die Planungsqualität und die Planungssicherheit zu erhöhen (Gudehus 2004, S. 126–127; Eley 2012, S. 11). Es können auch nicht real existierende Systeme, also Planungsvarianten, untersucht werden. Dynamische Simulationen ermöglichen es, eine ideale (planungsspezifische) Auslegung von

Ressourcen zu bestimmen. Anhand unterschiedlicher Simulationsszenarien können zukünftige Anforderungen untersucht und durch festzulegende Kriterien und Kennzahlen bewertet werden. Diese Ergebnisse müssen in der Layoutgestaltung berücksichtigt werden (Kerkenberg 2014, S. 437). Durch den Abgleich von Ausgabewerten mit Zielgrößen können eine objektive Bewertung durchgeführt und somit Entscheidungsprozesse unterstützt werden. Weiterhin lassen sich verbesserte Strategien für die Einplanung von Aufträgen oder bei Auftreten von Störungen für den laufenden Betrieb simulativ ermitteln.

Allgemein gilt jedoch zu beachten, dass ein Simulationsmodell kein Ersatz für eine gewissenhafte Planung darstellt, sondern vielmehr als unterstützendes Planungswerkzeug zu betrachten ist (Eley 2012, S. 11). Allerdings erfordert die Erstellung von Simulationsmodellen einen großen Zeit- und Kostenaufwand. Bracht und Masurat formulierten bereits : *„Wenn es gelingt, eine automatische Generierung der Simulationsmodelle aus den Planungsdaten zu erzeugen, werden zukünftig die Aufwände sinken“* (Bracht und Masurat 2005, S. 364).

In der Gesamtmethodik soll die Materialflusssimulation aus den dargestellten Gründen als wichtige Methode eingesetzt werden, um den Planungsprozess zu unterstützen und die Qualität der Planungslösung abzusichern. Gleichzeitig stellt die automatisierte Modellgenerierung eine wichtige Anforderung dar, um den Simulationseinsatz effizienter zu gestalten.

### 3 Stand der Forschung und Praxis

In diesem Kapitel werden zunächst vorhandene Ansätze und Methoden zur Kombination von Simulation mit Verfahren der Anordnungsplanung und -optimierung vorgestellt. Anhand wesentlicher Untersuchungskriterien, die aus den aktuellen Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Layoutplanung abgeleitet werden, erfolgt eine Bewertung der vorgestellten Methoden aus der Forschung und der Praxis. Aus dieser Bewertung wird der Forschungsbedarf hergeleitet und die Zielsetzung dieser Arbeit formuliert.

#### 3.1 Stand der Forschung und Praxis zum kombinierten Einsatz von Simulation mit Verfahren der Anordnungsoptimierung

Aufgrund der komplexen Analysemöglichkeiten von realen und geplanten Systemen hat sich die Simulation als wichtiges Werkzeug zur Planungsunterstützung etabliert (Grundig 2015, S. 241; Briano et al. 2010, S. 201). Im folgenden Abschnitt erfolgt mittels Methoden aus Forschung und Praxis eine Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten von Simulation in Verbindung mit Anordnungsverfahren in der Layoutplanung.

##### 3.1.1 Simulation zur Unterstützung der Layoutplanung und Anordnungsoptimierung

Der Simulationseinsatz zur Unterstützung der Layoutplanung und Optimierung der Anordnung basiert auf zwei unterschiedlichen Ansätzen, die nach (Aleisa und Lin 2005, S. 1381–1383) folgende Charakteristiken aufweisen:

##### **Ansatz 1 - Anordnung planen/optimieren und anschließend simulieren**

- Das Layout wird als global und strategisch angesehen. Es wird anhand der vorliegenden Planungsdaten eine Anordnung ermittelt bzw. optimiert.
- Die Simulation dient der lokalen und operativen Optimierung von Prozessen und Abläufen.
- **Grundlage:** Produktionsstrategien und Produktionstechnik sind bereits bekannt. Die Optimierung der Transportwege oder –kosten ist ein wesentlicher Planungsaspekt.
- **Ziel:** Vergleich, Anpassung/Optimierung und Auswahl von Varianten (Aleisa und Lin 2005, S. 1382).

### **Ansatz 2 - Simulation durchführen und anschließend die Anordnung erstellen/optimieren**

- Durch die Simulation werden zunächst die Prozesse passend ausgelegt und grundlegende Systemanforderungen abgesichert (Durchsatz, Auslastung, etc.). Die Verwendung von stochastischen Werten ist möglich.
- Aus der Simulation ergeben sich genauere Daten (z.B. Materialflüsse und Mengen) für die Layoutplanung und die Anordnungsoptimierung.
- **Grundlage:** Produktionsstrategien und Produktionstechnik sind noch nicht (vollständig) bekannt.
- **Ziel:** Vermeidung von Engpässen, Sicherstellung einer guten Systemauslegung und Aufbereitung einer genauen Datenbasis für Layoutoptimierungsverfahren (Aleisa und Lin 2005, S. 1382–1383).

Ein wesentlicher Vorteil des ersten Ansatzes liegt im geringeren Zeitbedarf, wohingegen der zweite Ansatz bessere Ausgangsdaten für die Layoutoptimierung bereitstellt (Aleisa und Lin 2005, S. 1383). Beide Planungsansätze zur Layoutgestaltung und –optimierung werden in verschiedensten Ausprägungen bzw. mit unterschiedlichen Zielsetzungen angewendet.

Die folgenden Anwendungsfälle sind beispielhaft für den Ansatz 1 (erst Layout planen und anschließend simulieren) zusammengefasst.

#### **3.1.1.1 Anwendungsfälle Ansatz 1 – Anordnung planen/optimieren und anschließend simulieren**

Im Folgenden werden die in der Literatur bekannten Ansätze zur Kombination von Layoutplanung und Anordnungsoptimierung mit der Simulation vorgestellt und eingeordnet.

**Yazici** ordnet Simulation als wichtiges Werkzeug zur Bewertung und Auswahl von Layouts ein und beschreibt die Anwendung in der Lehre. Hier bietet die Simulation Vorteile für die Planung und den Test von diversen Steuerungsstrategien durch unterschiedliche Layoutvarianten der Werkstatt- und Inselfertigung und hilft dem Anwender, ein besseres Systemverständnis zu entwickeln. Die Visualisierung und Quantifizierung der Vorgänge und Ergebnisse sind wichtige Aspekte bei der Entscheidungsunterstützung (Yazici 2006, S. 73–86). Dieser Ansatz zielt zwar auf die Steigerung des Systemverständnisses ab, wie jedoch diese Erkenntnisse in die Layoutplanung und -verbesserung einfließen können, wird nicht thematisiert. Die quantitativen Ergebnisse sind in der Entscheidungsunterstützung hilfreich, werden

jedoch ohne stochastische Einflussgrößen erzeugt. Daher ist dieser Ansatz der statischen Planung zuzuordnen.

**Smuktupt und Wimonkasame** nutzen den Simulator Arena zur Layoutbewertung und integrieren diesen in ein Microsoft Visual Basic basiertes Programm. In diesem Programm wird in Anlehnung an den CRAFT Algorithmus eine Anordnungsoptimierung durchgeführt. Jede Anordnungsvariante wird durch das Programm an den Simulator übergeben. Die Simulationsergebnisse werden anschließend als Ergebnisübersicht angezeigt. Neben dem Transportaufwand werden auch Transport- und Wartezeiten ausgewertet (Smuktupt und Wimonkasame 2009, S. 1834–1838). Auch bei diesem Ansatz wird eine quantitative Bewertung ermöglicht, die aber nicht erneut in die Layoutplanung einbezogen werden. Bei der Layoutoptimierung wird ein Verbesserungsverfahren eingesetzt, welches jedoch keine Aussage über das globale Optimum zulässt.

Die Relevanz der Simulation für die Gestaltung und Überprüfung von Layouts wird von **Briano et al.** anhand eines Beispiels aus der Tragflächenproduktion des Airbus A380 beschrieben. Zentraler Bestandteil der Untersuchungen ist dabei die Identifikation von Engpässen und die Auslastung von Transportmitteln. Aus den Bewertungskriterien, u.a. auch der Transportmittelauslastung, wurden Verbesserungsbedarfe für das Layout und Handlungsalternativen abgeleitet, die wiederum in die Planung einfließen (Briano et al. 2010, S. 201–206). Bei dieser Vorgehensweise werden Erkenntnisse aus der Simulation in die Layoutplanung einbezogen, statt nur Varianten zu bewerten. Allerdings erfolgt keine Beschreibung ob bzw. welche Verfahren zur Anordnungsoptimierung verwendet werden. Durch diese soll eine optimierte Startlösung für die weitere Planung erzeugt und die Qualität der Layouts gesteigert werden.

Die Bewertung von Layouts durch Simulation wird ebenfalls von **Shahin und Poormostafa** behandelt. Sie streben hauptsächlich die Erweiterung der Analyse- und Bewertungsmöglichkeiten an. Dabei sollen weitere Methoden, z.B. Quality Function Deployment (QFD)<sup>17</sup>, Analytical Hierarchy Process (AHP)<sup>18</sup> und Topsis

---

<sup>17</sup> QFD ist eine Methode zur konsequenten Übertragung von Kundenanforderungen auf Produkte oder Dienstleistungen und kann darüber hinaus auch zur Optimierung von Geschäftsprozessen eingesetzt werden. (Saatweber 2011, S. 132) (Gaubinger et al. 2009, S. 130,132)

<sup>18</sup> AHP ist eine Methode zur Entscheidungsunterstützung und wurde von Dr. Thomas L. Saaty entwickelt. Sie ermöglicht eine genauere und differenzierte Betrachtung von Entscheidungsprozessen als z.B. die Nutzwertanalyse durch die Unterteilung des Entscheidungsproblems in kleinere Teilprobleme und eine präzise Kalkulation der Gewichtungsfaktoren über mehrere Hierarchieebenen. (Bhushan und Rai 2004, S. 15–17)



(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions)<sup>19</sup>, eingesetzt werden, um die multikriterielle Layoutbewertung zu verbessern, dabei quantitative und qualitative Aspekte zu berücksichtigen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Durch den Ansatz von Shahin und Poormostafa soll die Erstellung eines Rankings der Layoutalternativen und somit auch die Identifikation eines besten Layouts erleichtert werden (Shahin und Poormostafa 2011, S. 95–102). Shahin und Poormostafa verbessern mit ihrer Methode die anwenderorientierte und multikriterielle Layoutbewertung. Wie auch bei den vorigen Ansätzen zur simulationsgestützten Layoutplanung wird Simulation als reines Hilfsmittel zur Bewertung von Varianten verwendet, wodurch die weiteren Potentiale für die Verbesserung der Datengrundlage für die Anordnungsverfahren und der Planungsergebnisse insgesamt ungenutzt bleiben.

Auch bei **Srinivas et al.** liegt der Schwerpunkt des Simulationseinsatzes bei der Layoutplanung von mehrreihigen, flexiblen Fertigungssystemen auf der Analyse und Bewertung. Darüber hinaus dient die Simulation als Werkzeug für die Validierung des Anordnungsverfahrens, mit dem die Layouts erzeugt werden. Als Anordnungsverfahren wurde ein Ameisenalgorithmus, der metaheuristische Ant-Colony-Optimization (ACO) Ansatz, verwendet. Die Simulationsergebnisse bestätigen die Anordnungsergebnisse mit geringen Transportaufwänden ebenfalls durch die kurzen Produktionszeiten (Srinivas et al. 2013, S. 34–43). Bei diesem Ansatz bleibt offen, ob eine stochastische oder eine deterministische Simulation durchgeführt wurde und somit, ob die Vorgehensweise der statischen oder dynamischen Planung zuzuordnen ist. Der Einsatz metaheuristischer Verfahren ermöglicht die Erzeugung von optimierten und zulässigen Anordnungen. Allerdings ist es durch die Verwendung von heuristischen Optimierungsverfahren keine Überprüfung möglich, ob die Lösungen optimal sind.

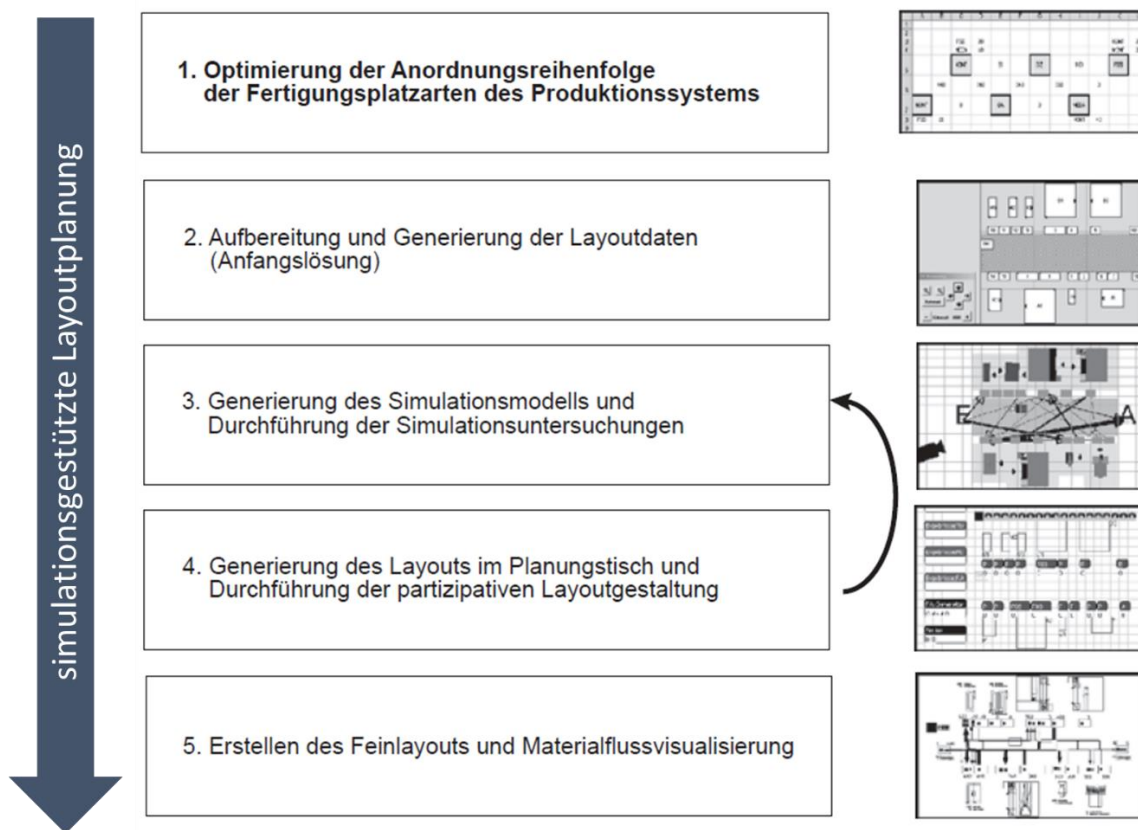
**Dombrowski und Ernst** thematisieren das Problem der unscharfen Planungsdaten aufgrund von Unsicherheiten, die sich aus un stetigen Nachfragen, hoher Marktdynamik und dem Wettbewerbsdruck ergeben. In den Layoutplanungen sollen diese Unsicherheiten berücksichtigt und mit unterschiedlichen Szenarien für die zukünftigen Entwicklungen getestet werden. Mittels Szenario-Technik lassen sich unterschiedliche Projektionen der Zukunft entwickeln. Darauf aufbauend werden möglichst flexible Layoutvarianten geplant und im Anschluss die entsprechenden Simulationsmodelle erstellt. Die Simulation wird bei Dombrowski und Ernst zur optimalen Systemauslegung sowie zur Analyse und Bewertung von

---

<sup>19</sup> Topsis ist eine Bewertungstechnik für multikriterielle Entscheidungen. Dieser Ansatz soll einen vergleichsweise geringen Arbeitsaufwand erfordern und wurde 1981 von Hwang und Yoon konzipiert.

Layouts im Hinblick auf die Szenarien eingesetzt (Dombrowski und Ernst 2013, S. 354–359). Allerdings wird bei diesem Ansatz nicht beschrieben, wie oder mit welchen Anordnungsverfahren die möglichst flexiblen Layoutvarianten erzeugt werden. Die simulative Ermittlung der optimalen Systemauslegung und die Abschätzung einer geeigneten Variante für zukünftige Entwicklungsszenarien ist sinnvoll, um Planungsunsicherheiten zu verringern. Dem steht allerdings ein gesteigerter Aufwand für die Planung der Layouts und der Erzeugung von zahlreichen Simulationsmodellen entgegen. Wechselwirkungen zwischen Layout und Simulationserkenntnissen werden nicht berücksichtigt.

Von **Wirth, Gäse et al.** wurde ein umfangreicheres Vorgehensmodell zur simulationsgestützten Layoutplanung entwickelt (siehe **Abbildung 25**).



**Abbildung 25: Partizipative und simulationsgestützte Layoutplanung (Schenk et al. 2014, S. 242)**

Die Vorgehensweise zur simulationsgestützten Layoutplanung wird in fünf Schritte unterteilt. Zunächst wird eine Optimierung der Anordnungsreihenfolge der Objekte durchgeführt. Diese basiert auf der richtungsorientierten Transportmatrix, die als formales Modell angesehen wird. Die eingesetzten Anordnungsverfahren sind das Dreiecksverfahren nach Schmigalla (zur Minimierung des Transportaufwandes, vergleiche Kapitel 2.3.2) und das Verfahren

nach Martin, um die Anzahl rückläufiger Transporte zu verringern (Wirth et al. 2001, S. 330).

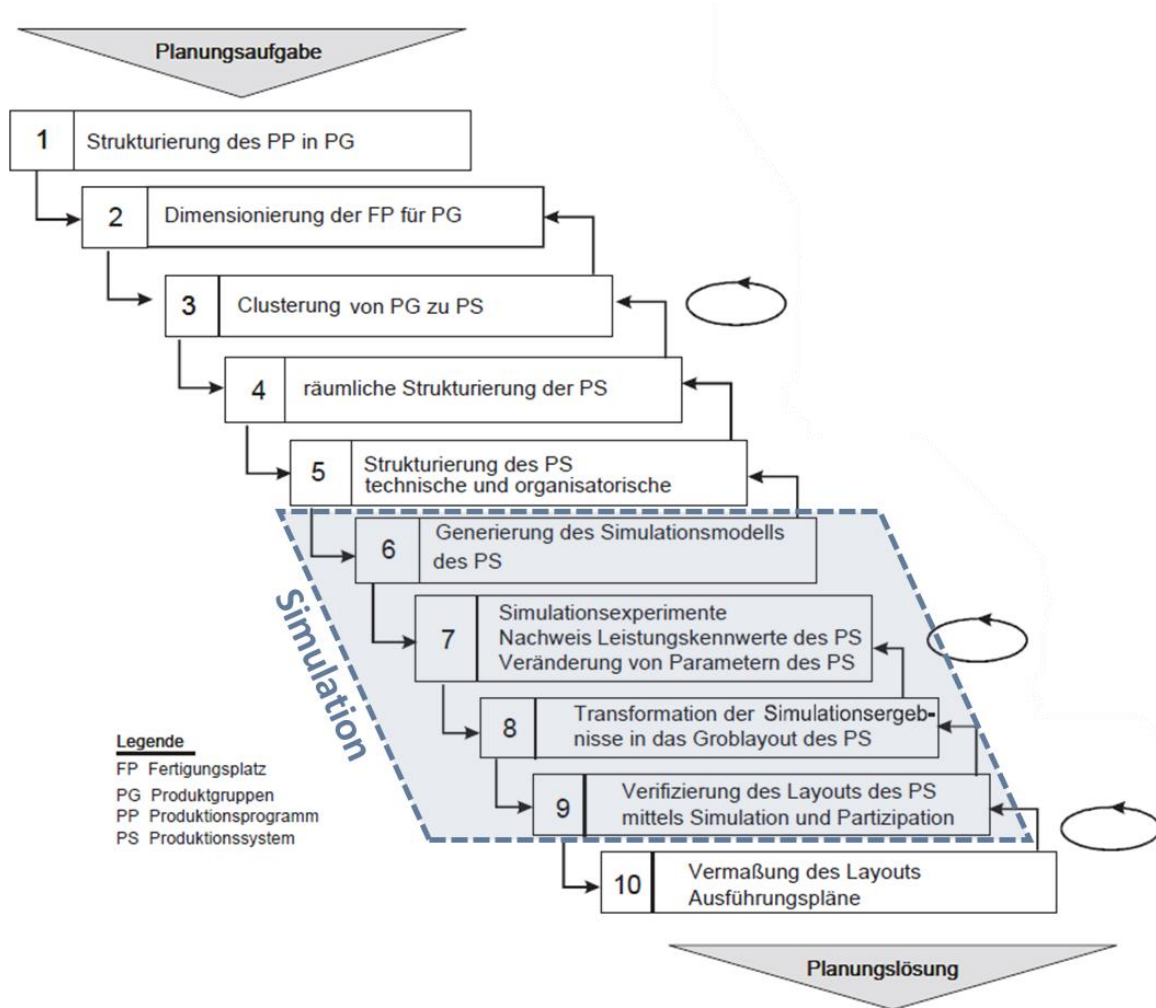
Im zweiten Schritt werden aus der Anordnungslösung ein einfaches Layout und die Layoutdaten erzeugt. Diese werden aus einer Produktionsdatenbank oder manuell ergänzt und bilden die Grundlage für die Simulationsmodellgenerierung in Schritt drei. Im Simulationsmodell können die Positionen der Objekte verändert, die neue Anordnung simuliert und in dem darauffolgenden Schritt 4 zur partizipativen Planung an den Planungstisch übermittelt werden. Das Modell des Planungstischs wird dabei aus den zuvor in der Datenbank gespeicherten Daten erzeugt, was eine Reduktion des Aufwands bei der Modellgenerierung ermöglicht. Mit dem Planungstisch sollen das Layout verifiziert sowie weitere Varianten erzeugt werden (Wirth et al. 2001, S. 331).

Die Daten der Layoutvarianten werden in der Datenbank des Planungstisches sowie der Produktionsdatenbank abgelegt. Daraus lassen sich wiederum die entsprechenden Simulationsmodelle erzeugen und die Varianten vergleichen. Der fünfte und letzte Schritt beinhaltet die Übertragung des Layouts aus der Datenbank über eine dafür entwickelte Schnittstelle in ein CAD-System (Wirth et al. 2001, S. 331).

Wirth et al. haben diese Vorgehensweise 2001 ausführlich vorgestellt. In der aktuellen Auflage des Fachbuches Fabrikplanung und Fabrikbetrieb wird dieser Ansatz von (Schenk et al. 2014) aufrecht erhalten und in Anlehnung an (Förster et al. 2001) in einen Kernprozess zur Planung von Produktionssystemen integriert. **Abbildung 26** stellt den Ablauf und die Integration der Planungsschritte dar.

Wegen der hohen Komplexität des Planungsprozesses werden die Planungsschritte iterativ und mit Rückkopplungen durchlaufen, wodurch ein gewisses Fehlerpotential vorliegt, welches durch subjektive Entscheidungen des Planers beeinflusst wird (Förster et al. 2001, S. 224).

Der Kernprozess umfasst zehn Schritte, die bei der Planung von Produktionssystemen abzuarbeiten sind.



**Abbildung 26: Integration von Planungsschritten in der Produktionssystemplanung (Förster et al. 2001, S. 224; Schenk et al. 2014, S. 232)**

Aufgrund der methodischen und softwaregestützten Integration der Planungsschritte lässt sich der Planungsprozess entscheidend verkürzen und auf die folgenden fünf Bereiche verringern (Förster et al. 2001, S. 224; Schenk et al. 2014, S. 232):

1. Simultane Dimensionierung und Strukturierung - Schritt 1- 4
2. Strukturierung des Produktionssystems hinsichtlich technologischer und organisatorischer Aspekte - Schritt 5
3. Simulationsbasierte dynamische Dimensionierung - Schritt 6-7
4. Partizipative simulationsgestützte Layoutplanung - Schritt 8-9
5. Vermaßung des Layouts und Erstellung von Ausführungsplänen - Schritt 10

Durch die Unterstützung und die teilweise Automatisierung der Planungsschritte wird der Fokus von der Erarbeitung von Lösungsvarianten auf die Bewertung der Lösungen verschoben (Förster et al. 2001, S. 224).

Die Simulation wird eingesetzt, nachdem ein erstes Layout auf Basis heuristischer Anordnungsverfahren vorliegt. In der Simulation ist es möglich, Positionen zu variieren und zu vergleichen. Eine konkrete Vorgehensweise zur weiteren Verbesserung der Layouts wird nicht erläutert. Im Rahmen einer partizipativen Planung kann die Anordnung am Planungstisch weiter angepasst und abgestimmt werden. Eine Rückkopplung zur Simulation ist möglich und dient erneut dem Vergleich von Varianten. Wie auch bei vorigen Ansätzen wird dieser dadurch erschwert, dass kein Bezug zum tatsächlichen Optimum hergestellt werden kann. Dies liegt an den verwendeten Anordnungsverfahren. Der Einsatz analytischer Verfahren hingegen ermöglicht die Ermittlung des globalen Optimums bzw. die Aussage, wie nah die gefundene Anordnung damit übereinstimmt. Darüber hinaus können bei den verwendeten Anordnungsverfahren keine Kriterien oder Randbedingungen zur räumlichen Strukturierung vorgegeben werden (z.B. Vorgabe der Position von Warein- und Ausgangslager), wodurch nachträgliche, händische Anpassungen notwendig werden. Diese sind einerseits zeitaufwändig, führen darüber hinaus auch zu einer Abweichung von der optimierten Anordnung. Eine Beurteilung, wie nah die gefundene Lösung bzw. das geplante Layout dem globalen Optimum entspricht, ist dadurch unmöglich.

Die partizipative Planung und der Einsatz von Planungstischen ist jedoch eine gute Möglichkeit, Layoutvarianten zu erzeugen, die alle Planungsrestriktionen beinhalten. Dies gilt vor allem, wenn Restriktionen noch nicht im Rahmen der Anordnungsoptimierung berücksichtigt werden konnten. Die Simulationsergebnisse fließen jedoch nach der Darstellung von Förster et al. in Abbildung 26 nur im Rahmen der partizipativen Planung ein. Eine Rückkopplung der Simulationsergebnisse in das Anordnungsverfahren findet jedoch nicht statt. Eine erneute Optimierung der gesamten Anordnung wird folglich nicht berücksichtigt und kann zu einer weiteren Entfernung der Lösung vom globalen Optimum führen.

Den Planungstisch als Werkzeug zur Absicherung des geplanten Layouts einzusetzen genügt den Anforderungen nicht vollständig, da das Zusammenwirken der Dimensionen von Hallen, Maschinen und Abständen nicht in vollem Umfang beurteilt werden kann. Hier bietet der Einsatz von Virtual Reality ein großes Potential.

Für den Ansatz 2 (erst simulieren, dann Layout planen) existieren in der Literatur ebenfalls verschiedene Anwendungsbeispiele. Im Folgenden werden sie zusammengefasst.

### **3.1.1.2 Anwendungsfälle Ansatz 2 – Simulation durchführen und anschließend die Anordnung erstellen/optimieren**

**Savsar** stellt 1991 einen simulationsbasierten Ansatz zur Layoutgestaltung vor, mit dem möglichst flexible und reaktionsschnelle Anordnungslösungen erzielt werden. Die Simulation verwendet Algorithmen für die Erstellung der Layouts und wird auch als Werkzeug zur Bewertung eingesetzt. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt bei Savsar auf der Flexibilität der Anordnung bezüglich der Veränderlichkeit von Produktionsanforderungen und bezieht u.a. Anpassungs- bzw. Umbaukosten ein. Grundlagen für die Anordnungsplanung/-optimierung sind die Materialflüsse zwischen den anzuordnenden Elementen und den Beziehungen untereinander durch ein closeness rating<sup>20</sup> (Savsar 1991, S. 155–165). Flexible und wandlungsfähige Layouts für die Produktion werden aufgrund der turbulenten Rahmenbedingungen unverzichtbar. Die Vorgehensweise nach Savsar liefert einen ersten Ansatz, um simulationsbasiert flexible Layouts durch Algorithmen zu erzeugen und anschließend zu bewerten. Jedoch werden diese statisch betrachtet. Umfangreiche Analysen durch die Materialflusssimulation in Verbindung mit leistungsfähigen Optimierungsmethoden für die Anordnungsplanung können die Qualität der Ergebnisse weiter steigern, vor allem wenn Wechselwirkungen zwischen Layout und Simulation integriert werden.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für den Ansatz „erst simulieren, dann Layout planen“ liefern **Eneyo und Pannirselvam**. Anhand einer Neuplanung für einen bestehenden Betrieb wird beschrieben, welche Ziele mit dieser Vorgehensweise erreicht werden sollen. Durch die Simulation der bestehenden Produktion sollen mögliche Engpässe, erforderliche Kapazitäten, Flächenbedarfe und Durchsatzmengen für die Neuplanung untersucht werden. Basierend auf den Simulationsergebnissen, lassen sich wichtige Erkenntnisse gewinnen, die in die Layoutplanung der neuen Produktion einfließen (Eneyo und Pannirselvam 1998, S. 1527–1532). Hier kommt die Simulation lediglich als Hilfsmittel für die Dimensionierung zum Einsatz, auf deren Basis das Layout erzeugt wird. Verfahren

---

<sup>20</sup> Closeness ratings werden eingesetzt, um zwei Elemente, die durch hohe Transportintensitäten miteinander in Beziehung stehen, möglichst benachbart anzuordnen. Die Werte der closeness ratings werden vom Planer vorgegeben und spiegeln eine Priorisierung der benachbarten Anordnung wieder. (Drexler und Domschke 1996, S. 209)

zur Anordnungsoptimierung sowie eine finale simulative Absicherung der Planung werden jedoch nicht beschrieben bzw. berücksichtigt.

In der Simulation und Planung von Layouts kommen bei **Azadivar und Wang** genetische Algorithmen zum Einsatz. Diese werden direkt in der Simulation ausgeführt und erzeugen verbesserte Anordnungslösungen. Dabei können auch dynamische Systemeigenschaften berücksichtigt werden. Der Ansatz von Azadivar und Wang kann mehrere Optimierungskriterien einbeziehen und liefert dafür optimierte Layouts. Es ist prinzipiell möglich mit diesem Ansatz optimale Lösungen zu finden, die Güte der Lösungen kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Empirische Untersuchungen zeigten jedoch deutliche Verbesserungen hinsichtlich der Zielkriterien (Azadivar und Wang 2010, S. 4369–4382). Bei der Optimierung hinsichtlich mehrerer Zielkriterien ist jedoch zu prüfen, wie die Lösungen verglichen und ausgewählt werden. Dies geht aus dem Ansatz von Azadivar und Wang nicht hervor. Für die Optimierung der Anordnung mit genetischen Algorithmen wird eine Basislösung benötigt, von der aus weitere Varianten erzeugt und davon die besten ausgewählt werden. Dies geschieht in Anlehnung an die natürliche Auslese mit der Erwartung, sukzessiv bessere Lösungen zu erreichen. Dadurch besteht aber jedoch das Risiko zwar eine Verbesserung zu erzielen, sich aber gleichzeitig vom Optimum zu entfernen. Die Simulation wird in diesem Fall nicht verwendet, um die grundsätzliche Funktionalität des Materialflusssystems abzusichern und somit die Planungssicherheit bzw. -qualität zu steigern.

**Altinkilinc** setzt analog zu Eneyo und Pannirselvam die Simulation zunächst zur Bewertung des bestehenden Systems ein. In unterschiedlichen Szenarien werden Losgrößen und Steuerungsregeln getestet, um die bestmögliche Konfiguration, die in der Layoutplanung berücksichtigt werden soll, zu ermitteln. Anschließend erfolgt die Layoutoptimierung durch den CRAFT Algorithmus und die erneute Auswertung/Analyse mittels Simulation (Altinkilinc 2004, S. 1079–1084). Die Ermittlung bzw. Absicherung der für die Layoutplanung anzunehmenden Größen und Steuerungsregeln liefert eine gute Datenbasis. Wie bei den zuvor vorgestellten Ansätzen und in Kapitel 2.2.2.1 beschrieben, liefert der CRAFT Algorithmus durch die paarweise Vertauschung der Flächen (um eine verbesserte Anordnung zu erzielen) keine (nachweislich) optimalen Ergebnisse. Die Qualität der Basislösung für das Verbesserungsverfahren beeinflusst dabei auch die Qualität der ermittelten Anordnung.

Auch **Edis et al.** verwenden Simulation zur Analyse und Bewertung des Ist-Layouts, um die Verbesserungen der neu geplanten Layoutvarianten ermitteln zu können. In einem Praxisbeispiel wird das Verbesserungspotential analysiert und

anhand der Gesamttransportzeit, der durchschnittlichen Transportzeit eines Produktes und des Gesamtoutputs bewertet (Edis et al. 2011, S. 97–104). Mit Hilfe der Simulation werden nach Edis et al. Optimierungspotentiale für das Layout abgeleitet. Eine konkrete Vorgehensweise für die Umsetzung bzw. die Anpassung des Layouts ergibt sich daraus jedoch nicht. Es bleibt unklar, wie die Erkenntnisse aus der Simulation während der Planung zu integrieren sind, um die ermittelten Potentiale zu nutzen.

### 3.1.2 Weitere simulationsgestützte Planungsmethoden

Neben den zuvor bereits vorgestellten Forschungsansätzen, die nach (Aleisa und Lin 2005) in zwei grundsätzliche Vorgehensweisen mit ihren spezifischen Zielsetzungen eingeordnet wurden, existieren weitere simulationsgestützte Planungsmethoden. Diese werden nachfolgend vorgestellt und eingeordnet.

Die 5D-Layout-Simulation (siehe **Abbildung 27**) berücksichtigt die 3D-Visualisierung des Layouts sowie der Kosten (4. Dimension) in Abhängigkeit von deren zeitlicher Entwicklung (5. Dimension). Das heißt, in der 5D-Simulation wird die Realisierung eines Layouts mittels 3D-Visualisierung und der anfallenden Kosten über einen bestimmten Zeitraum abgebildet.

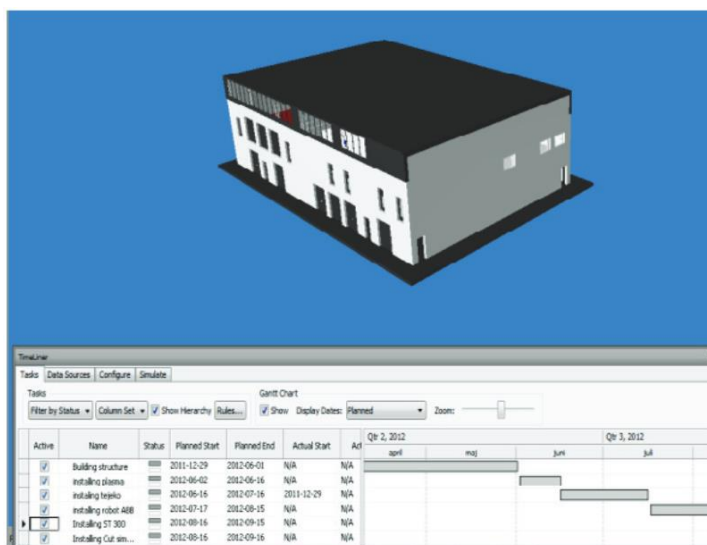


Abbildung 27: 5D-Simulation eines Layouts (Shariatzadeh et al. 2012, S. 303)

Dies fördert einen guten Überblick über die räumliche Anordnung aller Elemente und über die Abläufe zur Umsetzung, bevor die Realisierungsphase startet (Shariatzadeh et al. 2012, S. 302–303). Die Entwicklung des 3D-Layouts und die dabei verwendeten Anordnungsverfahren werden in diesem Ansatz nicht beschrieben. Eine zeitliche Entwicklung des 3D-Layouts wird dargestellt, die Integration der Materialflusssimulation findet jedoch nicht statt. Gleichzeitig



bleibt offen, ob diese Methode sich der dynamischen Planung wie in Kapitel 2.1 beschrieben, zuordnen lässt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Kombination von Anordnungsverfahren und der Simulation zur Erstellung von Produktionslayouts. Die 5D-Simulation ist hauptsächlich für die weiterführende Ausführungs- und Projektplanung geeignet. Daher werden diese simulationsgestützten Layoutplanungsmethoden nicht näher betrachtet.

### **3.1.3 Zwischenfazit**

Aus den vorgestellten Grundlagen und Beispielen geht hervor, dass die Simulation ein geeignetes und umfangreiches Werkzeug zur Bewertung von Layoutvarianten sowie eine wichtige Methode bei der dynamischen Planung darstellt. Darüber hinaus unterstützt sie die Optimierung des betrachteten Systems, die Vermeidung von Engpässen und ermöglicht es, eine verbesserte Datenbasis für die Planung zu erstellen. Insbesondere bei unscharfen Planungsdaten ist die Simulation ein wichtiges Hilfsmittel, um ein flexibles und effizientes Layout für unterschiedliche Zukunftsszenarien zu ermitteln. Die vorgestellten Ansätze bilden einen Beitrag zur Verbesserung des Planungsprozesses und der Layoutqualität, allerdings steht der praktischen Anwendung teilweise ein hoher Aufwand entgegen oder sie werden den aktuellen Anforderungen in der Layoutplanung nicht vollständig gerecht. Dies liegt zum Teil an den verwendeten Optimierungsverfahren und der mangelnden Verknüpfung von Simulationsergebnissen mit der Layoutplanung. In den beschriebenen Verfahren werden Anordnungsverfahren eingesetzt, die zulässige und optimierte Anordnungen erzeugen können. Jedoch ist bei keinem Verfahren ein Rückschluss möglich, wie weit sich die gefundene Lösung mit einem globalen Optimum deckt. Analytische bzw. exakte mathematische Anordnungsverfahren ermöglichen dies, werden aber bislang in keinem Planungsansatz berücksichtigt. Darüber hinaus müssen die durch die Anordnungsoptimierung gefundenen Lösungen in einem händischen Verfahren an Wegestrukturen oder Planungsvorgaben angepasst werden, wodurch weitere Abweichungen vom Optimum entstehen. Im nachfolgenden Kapitel werden daher die aktuellen Anforderungen an die Layoutplanung und den Simulationseinsatz zusammengefasst und Defizite der vorgestellten Ansätze betrachtet.

## **3.2 Ableitung des Untersuchungsbedarfes**

In diesem Kapitel werden zunächst wichtige Kriterien und Fragestellungen für die Einordnung der Ansätze zur simulationsgestützten Layoutplanung aus den Grundlagen und dem Stand der Technik abgeleitet. Die vorgestellten

Forschungsansätze werden darauf aufbauend analysiert und Defizite identifiziert. Daraus werden in Kapitel 4.1 Anforderungen für die kombinierte Gesamtmethodik abgeleitet.

### **3.2.1 Ableitung von Kriterien und Fragestellungen für die Analyse**

Die Layoutgestaltung hat einen starken Einfluss auf die Abläufe, die Effizienz und somit auch auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Planungsaufgaben fallen immer häufiger an und müssen effizient gelöst werden. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Fabrikplanungsaufgaben aufgrund von kürzer werdenden Produktlebenszyklen, sinkenden Losgrößen und volatilen Märkten. Daraus ergeben sich unscharfe Planungsdaten, denen mit möglichst flexiblen und wandlungsfähigen Layouts entgegengewirkt werden soll. Diese müssen mit dynamischen Methoden geplant werden, um diesen Herausforderungen gerecht zu werden.

Verfahren der mathematischen Anordnungsoptimierung eignen sich, um eine Ausgangsbasis für die weitere Layoutplanung zu erzeugen. Teilweise werden einfachere oder ungenauere graphische Verfahren eingesetzt, die nachträglich an Wegestrukturen angepasst werden müssen und keine Rückschlüsse auf die Qualität bzw. ein globales Optimum zulassen. Das globale Optimum bezieht sich hier, wie in Kapitel 2.2.2 definiert, auf die mathematisch exakt bestimmte Lösung des Anordnungsverfahrens zur Minimierung des Transportaufwands. Die Verwendung von Anordnungsoptimierungsverfahren, welche diese Defizite überwinden, stellt eine Basis dar, um die Planungsqualität zu steigern.

Bei der Planung und Auswahl von Layoutvarianten sind unterschiedliche Zielkriterien zu beachten, die sich teilweise gegenseitig ausschließen können. Als besonders relevantes Beispiel für das Spannungsfeld dieser Zielgrößen lassen sich die Flexibilität und die Effizienz anführen.

Untersuchungen zu diesen wichtigen dynamischen Aspekten werden immer komplexer und lassen sich daher in der Regel nicht mehr mit analytischen Methoden bewältigen. Daher ist die Ablaufsimulation in der Layoutplanung weit verbreitet, wird aber im Einzelfall mit unterschiedlichen Zielsetzungen verwendet. Bei der Planung komplexer Produktionssysteme lässt sich eine optimale Lösung nicht mehr statisch ermitteln. Für die Dimensionierung und die Ermittlung des Ressourcenbedarfes werden zunehmend dynamische Simulationen benötigt.

Dem Einsatz von Simulationsmethoden stehen jedoch ein hoher Aufwand sowie Zeit- und Kostenbedarf entgegen. Für die Erstellung von Simulationsmodellen und die Durchführung von Experimenten wird Expertenwissen benötigt, das nicht in

allen Unternehmen und bei allen Planungsbeteiligten verfügbar ist. Dadurch wird der konsequente Einsatz von Simulation im Rahmen der Layoutplanung gehemmt.

Simulationen werden nach unterschiedlichen Strategien in die Planung eingebunden. Eine grundsätzliche Einordnung der Vor- und Nachteile dieser Strategien wurde nach Aleisa und Lin (2005) in Kapitel 3.1 dargestellt. Diese sind durch den Zeitpunkt, an dem Simulationen in den Prozess integriert werden, gekennzeichnet.

Für die Bewertung der vorgestellten Methoden zur Layoutplanung in Kombination mit der Simulation sollen nachfolgend zunächst die Kriterien beschrieben werden. Diese leiten sich aus den aktuellen Rahmenbedingungen, den wissenschaftlichen Grundlagen sowie dem Stand der Forschung und Praxis ab. Aus den Kriterien lassen sich Fragestellungen formulieren, die bei der Analyse und Bewertung zugrunde gelegt werden.

### **Kriterien und Fragestellungen zur Untersuchung der Methoden:**

- 1. Anordnungsoptimierung:** Verfahren zur Optimierung der Anordnung (siehe Kapitel 2.2 bis 2.2.2) lassen sich zur Ermittlung optimierter (Anfangs-) Lösungen und der Verbesserung existierender Anordnungen einsetzen. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Ermöglicht der Ansatz die sinnvolle Nutzung und Integration von Verfahren zur Anordnungsoptimierung, um die Qualität des Planungsergebnisses zu steigern?*

- 2. Vergleich der Reallayouts mit einer optimalen Lösung:** Während des Planungsprozesses nach VDI Richtlinie 5200 wird zunächst eine Ideallösung ohne Restriktionen geplant und anschließend Reallayoutvarianten erzeugt. Insbesondere die Erstellung eines Ideallayouts mit exakten Verfahren zur Anordnungsoptimierung ermöglicht eine Gegenüberstellung von Reallayouts mit einer optimalen Lösung. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Lässt sich bei der Layoutbewertung nur ein relativer Vergleich verschiedener (Realplanungs-) Varianten vornehmen, oder kann auch eine Bewertung anhand eines tatsächlichen (mathematisch exakt bestimmten) Optimums erfolgen?*

- 3. Dynamische Planung:** Statische Planungen mit zusätzlichen Sicherheitsaufschlägen führten häufig zu Überdimensionierungen und

somit auch zu hohen Kosten. Steigende Komplexität der Planungsaufgaben erfordert die dynamische Betrachtung und Planung von Produktionssystemen und Anlagen. Vor allem durch den Einsatz von Simulationen ist dies möglich. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Werden dynamische Betrachtungen<sup>21</sup> durchgeführt anstatt nur statische Zusammenhänge zu berücksichtigen?*

- 4. Simulative Layoutbewertung:** Layouts lassen sich auf verschiedene Arten bewerten. Die Beurteilung durch Experten ist in der Regel schnell und aufwandsarm, wird jedoch durch subjektive Einflüsse geprägt. Simulationen ermöglichen hingegen eine Auswertung mit klar quantifizierbaren Ergebnissen. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Ist die Methode geeignet, um Layouts mittels der Durchführung von Simulationen zu bewerten?*

- 5. Rückkopplung von Layout und Simulation:** Das Layout hat Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Wichtige Erkenntnisse daraus sollten zur Steigerung der Planungsqualität wiederum in die Anordnungen einfließen. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Werden die wechselseitigen Einflüsse aus Simulation und Layoutplanung berücksichtigt? Liegen Regelungen vor ob und wie beispielsweise die Simulationsergebnisse in den Layouts einbezogen werden?*

- 6. Integration von 3D-Modellen:** Eine 3D-Layoutplanung bietet die Möglichkeit, Kollisionskontrollen durchzuführen und Planungsergebnisse anschaulich darzustellen. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Sieht der Ansatz die Verwendung von 3D-Modellen vor, um z.B. Mitarbeitern mit wenig Planungserfahrung eine einfache Übersicht zu ermöglichen oder die Ergebnisse in der virtuellen Realität abzusichern?*

---

<sup>21</sup> Dynamische Betrachtungen beziehen sich auf das zeitdynamische Zusammenwirken der Abläufe und Komponenten eines Produktionssystems. Diese werden durch den Einsatz von Simulationen ermöglicht.

- 7. Partizipative Planung:** Die Planung einer Fabrik kann nicht vollumfänglich von einer „zentralen“ Stelle allein durchgeführt werden. Vielmehr sind Mitarbeiter aus verschiedenen Fachbereichen in den Planungsprozess zu integrieren. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Bietet der vorgestellte Ansatz die Möglichkeit, verschiedene Mitarbeiter im Rahmen einer partizipativen Planung einzubinden?*

- 8. Schnelle Erstellung von Simulationsmodellen:** Die Erzeugung der entsprechenden Simulationsmodelle ist in der Regel mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Enthält der untersuchte Ansatz Methoden, die eine schnelle und einfache Erstellung von Simulationsmodellen ermöglichen?*

- 9. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit:** Um den turbulenten Rahmenbedingungen in der Produktion gerecht zu werden, müssen Layouts flexibel und wandlungsfähig sein. Zunehmend finden sich mobile Lösungen für Maschinen und Arbeitsplätze nach dem Plug and Produce Prinzip, die eine schnelle Anpassung des Layouts ermöglichen. Die für die Bewertung relevante Fragestellung lautet:

*Wird in dem Ansatz die anzustrebende Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Layoutergebnisses berücksichtigt?*

### 3.2.2 Analyse und Bewertung der bestehenden Methoden

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Methoden werden in diesem Abschnitt hinsichtlich der zuvor erläuterten Kriterien und Fragestellungen untersucht und bewertet. In der nachfolgenden **Abbildung 28** wird eine Übersicht der Bewertung dargestellt.

Anforderungen und Kriterien		1	2	3	4	5	6	7	8	9
untersuchter Ansatz		Anordnungsoptimierung (globales Optimum)	Vergleich der Reallayouts mit optimaler Lösung	dynamische Planung	simulative Layoutbewertung	Rückkopplung von Layout und Simulation (Ergebnisse)	Integration von 3D-Modellen	Partizipative Planung	Schnelle Erstellung von Simulationsmodellen	Flexibilität und Wandlungsfähigkeit
erst Layout gestalten und anschließend simulieren	Yazici (2006)	○	○	○	●	○	○	○	○	○
	Smutkupt und Wimonkasame (2009)	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	Briano et al. (2010)	○	○	●	●	●	○	○	○	○
	Shahin und Poormostafa (2011)	○	○	○	●	○	○	○	○	○
	Srinivas et al. (2013)	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	Dombrowski und Ernst (2013)	○	○	●	●	○	○	○	○	●
	Wirth, Gäse et al. (2001) Förster et al. (2001) Schenk et al. (2014)	●	○	●	●	●	●	●	●	○
Simulation durchführen und anschließend Layout gestalten	Savsar (1991)	●	○	○	●	○	○	○	○	●
	Eneyo und Pannirselvam (1998)	○	○	●	○	●	○	○	○	○
	Azadivar und Wang (2010)	●	○	●	●	●	○	○	○	○
	Altinkilinc (2004)	●	○	●	●	○	○	○	○	○
	Edis et al. (2011)	○	○	●	●	●	○	○	○	○
	Shariatzadeh et al. (2012)	○	○	○	○	○	●	○	○	○

Legende : ● erfüllt    ● teilweise erfüllt    ○ nicht erfüllt

**Abbildung 28: Bewertung der Methoden zum kombinierten Einsatz von Simulation und Layoutplanung anhand der aufgestellten Kriterien**

Keiner der untersuchten Forschungsansätze bietet die Möglichkeit, Reallayouts mit einer optimalen Lösung zu vergleichen. Rückschlüsse auf den Einfluss, den die Berücksichtigung einzelner Planungsvorgaben nimmt, sind daher nicht

möglich. Fast die Hälfte aller Autoren beziehen Verfahren zur Anordnungsoptimierung ein. Allerdings ist keines der verwendeten Anordnungsverfahren im Stande, eine nachweislich optimale Lösung zu erzielen. Dies ist dadurch begründet, dass alle Ansätze auf heuristischen Methoden basieren. Dadurch können zwar zulässige und gute Ergebnisse ermittelt werden, es ist jedoch keine Bewertung der Lösungsqualität möglich.

Wirth, Gäse et al. verwenden u.a. das in der Fabrikplanung häufig genutzte Dreieckverfahren nach Schmigalla (siehe auch Kapitel 2.2.2.1). Als Ergebnis dieser Heuristik erhält man eine räumliche Anordnung der Objekte auf einem Dreiecksraster. Während des Verfahrens werden die Abstände zwischen den anzuordnenden Elementen über die Anzahl der Kanten ermittelt. Entfernungen werden daher immer mit demselben Faktor bewertet. Die Anordnung basiert lediglich auf den Transportintensitäten und dem Transportmoment, das durch die Entfernung bzw. die Transportweglänge als Anzahl der zwischen den Objekten liegenden Kanten beeinflusst wird. Dabei werden noch keine realen Flächen und Distanzen berücksichtigt, wodurch meist kein Optimum erreicht werden kann. Eine weitere Abweichung vom Optimum ergibt sich durch die nachträgliche, händische Anpassung der Anordnung, z.B. an rechteckige Grundrisse und Wegstrukturen aus dem Dreiecksraster.

Exakte mathematische Verfahren zur Anordnungsoptimierung sind in der Lage, eine sehr gute Ausgangslösung für die Layoutplanung zu schaffen und können somit die Qualität von Layouts verbessern. Diese finden in der Wissenschaft und Praxis bislang nur in wenigen Bereichen Anwendung. Daher gilt es im weiteren Verlauf der Arbeit zu untersuchen, wie sich diese in der Simulation und die Gesamtmethodik effizient integrieren lassen.

Die Erstellung von Simulationsmodellen muss spezifisch für jedes Untersuchungsziel erfolgen. Darüber hinaus muss eine Anpassung des Modells für jede Layoutvariante durchgeführt werden und ist daher mit einem großen Aufwand verbunden. Vor allem die reine Bewertung von Layouts mittels Simulation führt zu einem hohen Zeit- und Kostenaufwand. Einzig der Ansatz zur simulationsgestützten, partizipativen Layoutplanung nach *Wirth, Gäse et al. (2014)* beinhaltet die Möglichkeit, Simulationsmodelle automatisiert zu generieren. Der Fokus des Simulationseinsatzes liegt dabei ebenfalls auf dem Vergleich von Layoutvarianten. Dieser integrierte Ansatz bietet in vielen Bereichen ein hohes Potenzial für den praktischen Einsatz. Auch die Einbindung mehrerer Planungsbeteiligter in die Layoutgestaltung ist ein wichtiger Faktor.

Einige Teilaspekte dieses Ansatzes weisen jedoch weiteres Verbesserungspotential auf. Die Übertragung der Daten zwischen unterschiedlichen Softwaretools wird durch die verwendeten, sehr spezifischen Lösungen, wie selbstentwickelte Datenbanken erreicht. Ein Hindernis für die praktische Anwendung für die Unternehmen stellt die Verfügbarkeit dieser Speziallösungen dar. Die in dem Prozess verwendeten Verfahren zur Anordnungsoptimierung sind zwar in der Fabrikplanung etabliert, sollten jedoch, um eine noch bessere Ausgangslösung zu schaffen, weiterentwickelt oder durch leistungsfähigere Verfahren ersetzt werden.

Die Verbindung mit anderen Methoden der Digitalen Fabrik lässt sich erweitern. Um die Planungsqualität weiter abzusichern und Entscheidungs- bzw. Freigabeprozesse zu vereinfachen ist beispielsweise der Einsatz von Virtual Reality oder der partizipativen Planung zu erweitern.

### **3.2.3 Zusammenfassung des Forschungsbedarfes**

Bei allen bisher vorgestellten Ansätzen ist eine Kernaufgabe der Simulation die Bewertung und Analyse von Layoutvarianten. Der äußerst wichtige Aspekt der dynamischen Dimensionierung<sup>22</sup> wird bei vielen Ansätzen nicht beachtet. Besonders in Verbindung mit der Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien und dem Zielkonflikt der Flexibilität mit der Effizienz muss dieser Punkt in einer neuen Gesamtmethodik berücksichtigt werden.

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen im Betrieb und in der dynamischen Fabrikplanung erscheint es sinnvoll, durch die vorausschauende Erstellung von Simulationsmodellen deren Einsatzmöglichkeiten in der Planung bzw. der Umplanung während der Betriebsphase auszuweiten. Durch ein stärkeres Frontloading, d.h. durch eine Verschiebung des Aufwandes in frühe Phasen, können positive Effekte für die Planung erzielt werden.

Interdisziplinäre Planungsteams müssen durch intuitive und leicht zu nutzende Softwarelösungen bei der Bewältigung ihrer Aufgaben unterstützt werden. Diese Unterstützung ist, sowohl für die Durchführung von Simulationsuntersuchungen als auch der Layoutbewertung, weiter zu verbessern.

Die Planung mit Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik in Verbindung mit ganzheitlichen Planungsansätzen sowie veränderten Planungsstandards fördert das Bedürfnis nach einer Neuausrichtung und Neugestaltung der

---

<sup>22</sup> Unter dynamischer Dimensionierung wird die Kapazitätsauslegung der Komponenten eines Produktionssystems unter Betrachtung dynamischer (zeitabhängiger) Zusammenhänge und Abläufe durch den Einsatz von Simulationen verstanden.



Planungsprozesse, bei denen die Elemente der Digitalen Fabrik wesentlich effizienter eingesetzt werden können (Bracht et al. 2018b, S. 64).

Da Flexibilitätskorridore immer häufiger überschritten und die Produktionssysteme gewandelt werden, ist es erforderlich, dass eine Gesamtmethodik zur Layoutplanung die daraus resultierenden Anforderungen berücksichtigt und einen schnellen Anpassungsprozess ermöglicht.

Aus den beschriebenen Defiziten und Rahmenbedingungen lässt sich ableiten, dass Methoden notwendig sind, die es ermöglichen, Layouts mit verringertem Zeitaufwand zu planen, dynamisch abzusichern und mit den Planungsbeteiligten abzustimmen. Insbesondere der Übergang zu einer kontinuierlichen Layoutplanung kann dadurch vorangetrieben werden. Im Folgenden soll daher eine Gesamtmethodik entwickelt werden, welche diesen Prozess effizient unterstützt und eine hohe Planungsqualität gewährleistet. Dafür sind geeignete Verfahren zur Anordnungsoptimierung auszuwählen und in einer Gesamtmethodik zu integrieren. Darüber hinaus ist die Einbindung von Materialflusssimulationen aufwandsarm, mit umfangreichen dynamischen Analysemöglichkeiten zu gestalten.

### **3.2.4 Definition des Forschungsziels**

Das Ziel ist die Entwicklung einer Gesamtmethodik, welche die Vorteile von Verfahren der mathematischen Anordnungsoptimierung mit denen der Simulation kombiniert und dadurch den Planungsprozess und die Planungsergebnisse verbessert.

Die Entwicklung der Gesamtmethodik umfasst folgende Bereiche mit entsprechenden Teilzielen und Fragestellungen:

#### **Anordnungsoptimierung**

- *Welche mathematischen Verfahren sind für die optimierte Anordnung von Maschinen entlang einfacher Wegestrukturen geeignet?*
- *Wie muss ein Anordnungsverfahren gestaltet werden, damit es effizient eine gute Ausgangsbasis für die weitere Layoutplanung liefert?*

Das Teilziel des Bereichs Anordnungsoptimierung ist die Untersuchung und Auswahl bestehender Verfahren zur Verwendung in der zu entwickelnden Gesamtmethodik sowie die Erarbeitung eines dafür geeigneten heuristischen Verfahrens zur Anordnung von Maschinen an kreuzungsfreien Wegstrukturen.

### **Materialflusssimulation**

- *Wie lässt sich die Materialflusssimulation effizient in der Layoutplanung anwenden?*
- *Wie können die Hemmnisse beim Einsatz von Simulation, wie z.B. die fehlende Datengrundlage mit einem entsprechenden Detaillierungsgrad, der hohe Zeit- und Kostenaufwand sowie das erforderliche Expertenwissen, reduziert werden?*

Die zu verfolgenden Teilziele beziehen sich auf die Ableitung von Anforderungen für eine durchgängige Unterstützung des Planungsprozesses durch die Materialflusssimulation. Gemäß den aufgestellten Anforderungen soll ein Simulationsbasismodell entwickelt werden, das in Verbindung mit den erforderlichen Planungsdaten automatisiert die entsprechenden Simulationsmodelle generiert und dem Anwender verschiedene planungsbezogene Analysemöglichkeiten eröffnet. Das Modell ist dabei so zu gestalten, dass eine kontinuierliche Anpassung und Verbesserung des Layouts während der Betriebsphase, z.B. aufgrund sich ändernder Produktionsprogramme, unterstützt wird. Darüber hinaus gilt es die organisatorischen Rahmenbedingungen und die Verantwortlichkeiten für die Durchführung der Simulation festzulegen (siehe Kapitel 4.7).

### **Kombination und Integration**

- *Wie können mathematische Verfahren zur Anordnungsoptimierung mit der Materialflusssimulation im Rahmen der Layoutplanung kombiniert werden?*
- *Wie können diese Verfahren bzw. deren Ergebnisse und die Materialflusssimulation im Rahmen einer Gesamtmethodik zur Produktionslayoutplanung integriert werden?*
- *Welche weiteren Planungsmethoden und -werkzeuge sollten in die Gesamtmethodik eingebunden werden?*

Ziel dieses Untersuchungs- und Entwicklungsbereichs ist die Ermittlung einer geeigneten Methode, um die Materialflusssimulation mit den mathematischen Verfahren zur Anordnungsoptimierung zu verbinden. Dabei ist zu betrachten, wie Anordnungsverfahren oder deren Ergebnisse und die Simulation in einer Gesamtmethodik integriert und kombiniert werden können. Anschließend gilt es zu überprüfen, mit welchen weiteren Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik die zu entwickelnde Gesamtmethodik unterstützt werden kann. Der Anwendungsbereich der zu entwickelnden Lösungen wird im Rahmen dieser Arbeit auf die anordnungsoptimierte Planung von Produktionslayouts mit

einfachen, kreuzungsfreien Wegestrukturen bezogen, um das grundsätzliche Potential der Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation in einer Gesamtmethodik zu untersuchen.

Es gilt ein Konzept zu entwickeln, die Anordnungsoptimierung mit der Materialflusssimulation zu verbinden und dieses praktisch umzusetzen. In den Planungsprozess sind VR-Methoden und partizipative Werkzeuge zur Steigerung und Absicherung der Planungsqualität einzubeziehen. Der Aufwand des Simulationseinsatzes ist dabei zu reduzieren, was durch eine automatisierte Modellgenerierung realisiert werden soll.

## 4 Entwicklung einer kombinierten Gesamtmethodik

Aus dem in Kapitel 3 aufgezeigten Forschungsbedarf und der Zielsetzung dieser Arbeit werden zunächst wichtige Anforderungen abgeleitet und Teilziele zur Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation in der Produktionslayoutplanung definiert. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Erreichung der Teilziele und Entwicklung der Gesamtmethodik beschrieben.

Bei der Umsetzung fließen die Grundlagen aus Kapitel 2 und Teilergebnisse aus dem SWZ Forschungsprojekt „Anforderungsrobuste Anordnung von Betriebseinheiten und Maschinen durch Kombination von Optimierung und Simulation“ (Bracht et al. 2018a; Bracht et al. 2017; Fischer et al. 2017) mit ein.

In der Gesamtmethodik werden die erarbeiteten Konzepte und Umsetzungen zur Kombination der Materialflusssimulation mit den mathematischen Anordnungsverfahren zusammengeführt und mit weiteren Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik verknüpft.

### 4.1 Abgeleitete Anforderungen und Ziele

Aus den identifizierten Defiziten lassen sich wichtige Anforderungen an eine Gesamtmethodik ableiten. Die aktuellen Rahmenbedingungen, die sich aus dem Wettbewerbsumfeld und allgemeinen technologischen Entwicklungen ergeben, sowie deren Einflüsse auf die Unternehmen und die Planung stellen dabei wichtige Faktoren dar. **Abbildung 29** greift die Rahmenbedingungen, Defizite und Anforderungen auf.

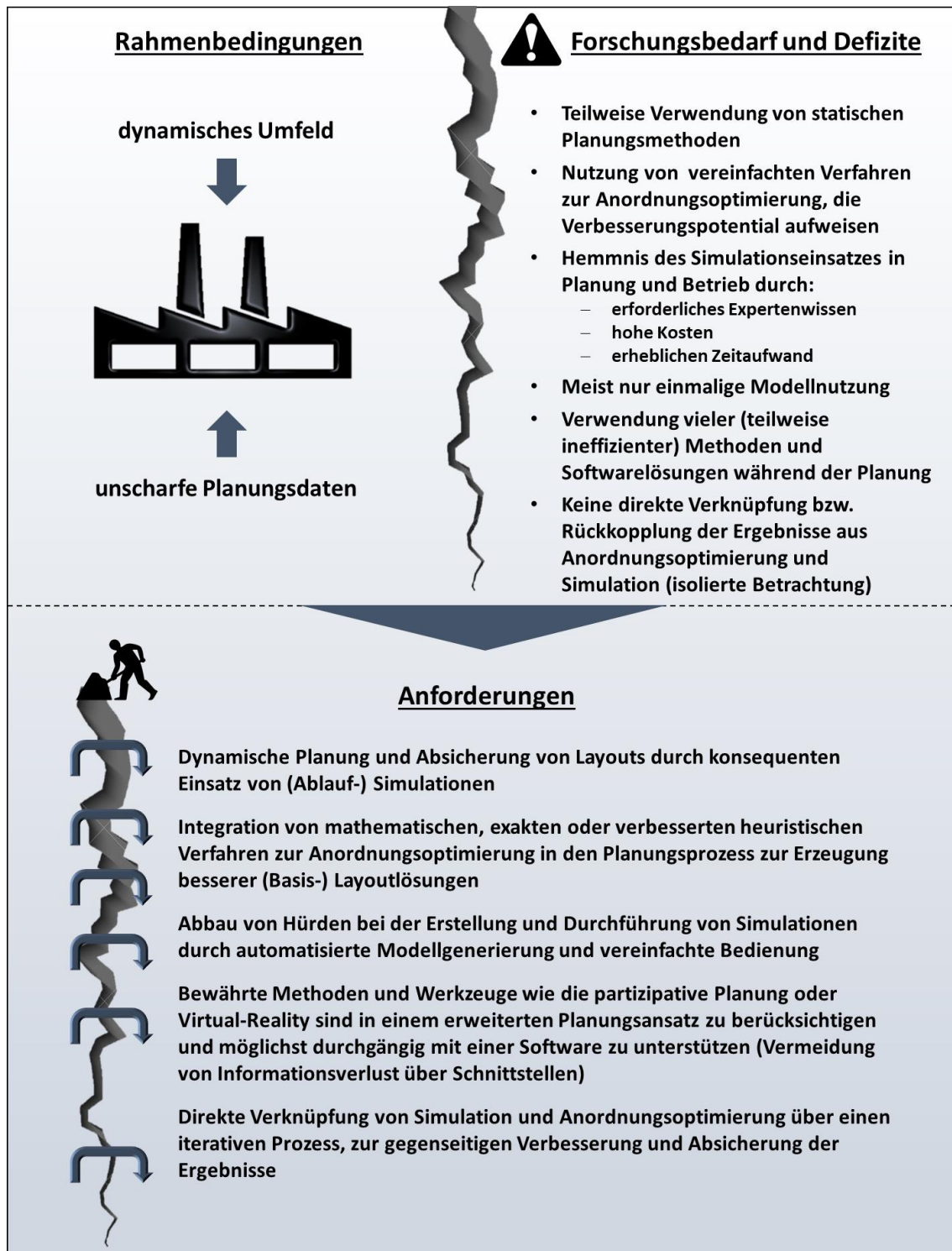
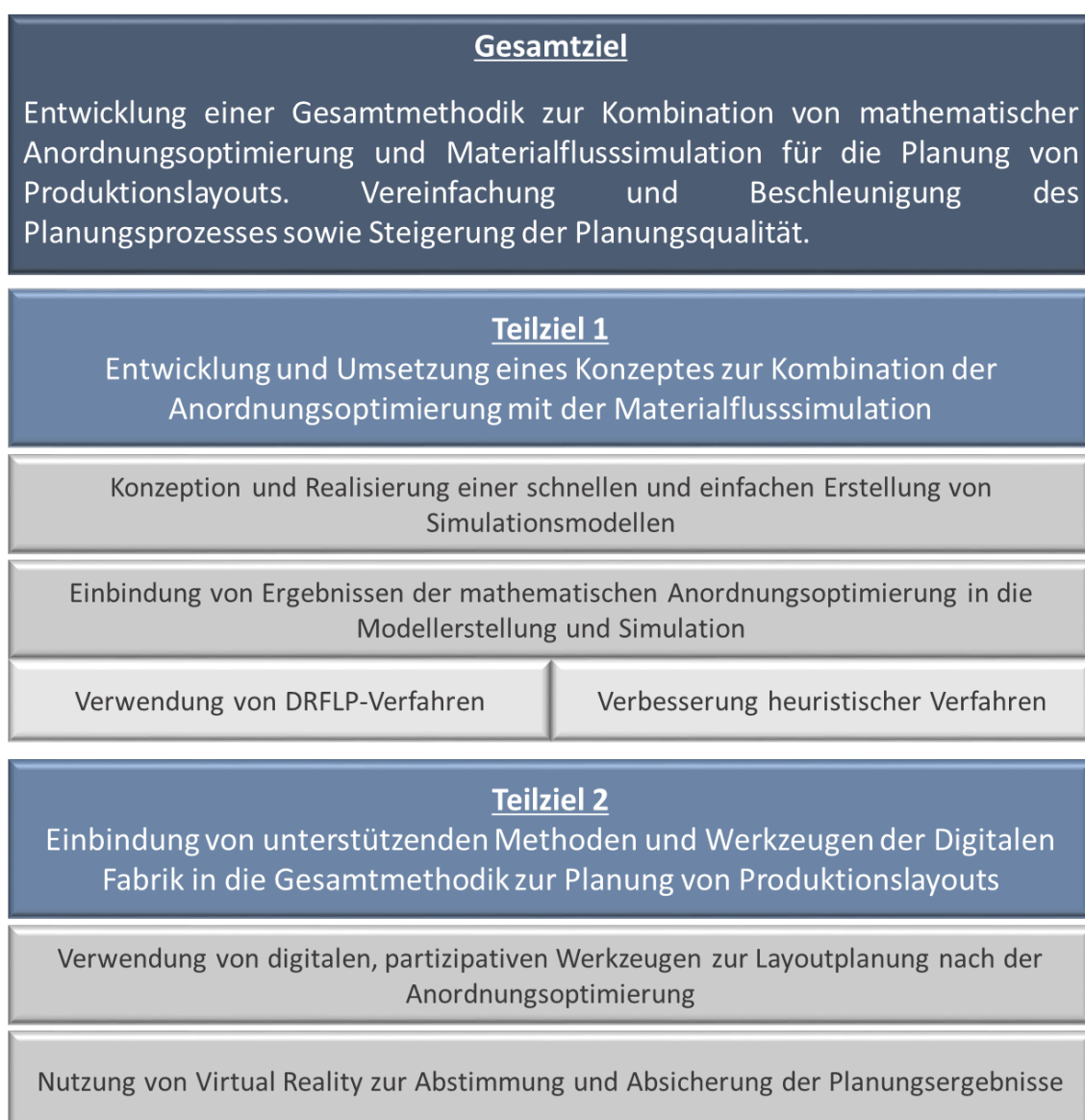


Abbildung 29: Rahmenbedingungen, Defizite und Anforderungen an eine neue Gesamtmethodik

Das dynamische Wettbewerbsumfeld und steigende Kundenanforderungen erfordern eine häufigere Anpassung der Produktion und der Layouts an neue Produkte, Prozesse und Technologien (siehe Kapitel 2.1.1) während der

Betriebsphase. Gleichzeitig wirkt sich diese Dynamik auch negativ auf die Prognostizierbarkeit von Planungsprämissen aus. Die größtenteils statischen Layoutplanungsmethoden sind daher häufig nicht im Stande, diesen Sachverhalt bei der Anordnung von Maschinen und Betriebseinheiten zu berücksichtigen.

Daraus entsteht eine Lücke zwischen den Rahmenbedingungen und den Ergebnissen von klassischen Planungsmethoden. Um dieses Defizit zu schließen, müssen die in **Abbildung 29** formulierten Anforderungen erfüllt werden. Die Anforderungen lassen sich in Teilziele überführen und werden der Zielsetzung dieser Arbeit untergeordnet (siehe **Abbildung 30**).



**Abbildung 30: Ziele bei der Entwicklung der Gesamtmethodik**

Die abgebildeten Teilziele lassen sich in folgende drei Kategorien einteilen:

- Einbindung der mathematischen Anordnungsoptimierung in die Simulation
- Simulationsrelevante Zielsetzung: Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes für die automatisierte Generierung von Simulationsmodellen
- Verbindung mit unterstützenden Planungswerkzeugen und –methoden der Digitalen Fabrik

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Zielsetzungen detaillierter betrachtet und festgelegt, welche Voraussetzungen für die Entwicklung der Gesamtmethodik zu erfüllen sind.

#### **4.1.1 Einbindung der mathematischen Anordnungsoptimierung**

Es sollen zunächst mathematisch optimierte Anordnungslösungen für die Layoutplanung ermittelt werden. Exakte mathematische Methoden zur Lösung des DRFLP sind dafür sehr gut geeignet, aber durch die Einschränkung der Anzahl anzuordnender Objekte zum Teil limitiert. Die Verwendung heuristischer Lösungsverfahren wird daher bei zunehmender Anzahl der Objekte erforderlich. Bei der Einbindung von anordnungsoptimierten Startlösungen in die Simulationsmodelle sollen daher zwei Verfahren, das DRFLP und ein zu verbesserndes heuristisches Verfahren, verwendet werden (siehe auch Kapitel 2.2.2). Nachfolgend werden die Ausgangspunkte der ausgewählten Anordnungsverfahren für die Kombination mit der Simulation beschrieben:

##### **DRFLP - Lösungsmethoden**

Die Lösungen des DRFLP werden mit speziellen Solvern generiert, die ein Optimierungsprogramm auf Basis der vorgegebenen Eingangsdaten und der mathematischen Formulierung des Optimierungsproblems ausführen. Eine direkte Integration in eine Simulationssoftware ist daher nicht anzustreben. Deshalb ist es erforderlich, die so erzeugten Layouts in eine Struktur und ein (Daten-) Format zu überführen, das in der automatisierten Simulationsmodellgenerierung eingebunden werden kann.

Eine mögliche Variante zum Austausch von Layoutinformationen stellen Tabellen dar (beispielsweise als csv-Datei<sup>23</sup>). Diese können durch die Simulationssoftware und auch durch den Solver in Kombination mit einem Programm zur Unterstützung der Import- und Exportvorgänge verwertet werden. Eine solche

---

<sup>23</sup> csv steht für comma-separated value. Dieses Dateiformat ermöglicht einen Austausch bzw. das Speichern von z.B. tabellarisch strukturierten Daten.

Tabelle lässt sich direkt in der Simulation als Basisinformation über z.B. Maschinenposition bei der Modellerzeugung verwenden.

Methoden zur Lösung des DRFLP können zur exakten Bestimmung von optimalen Layouts für bis zu 16 verschiedene Objekte bzw. 21 bei Vorkommen mehrerer Maschinen gleichen Typs eingesetzt werden (vgl. Bracht et al. 2018a, S. 53-54) und ist über eine geeignete Importfunktion mit der Simulation zu verbinden.

### **Heuristische Anordnungsverfahren**

Das modifizierte Dreiecksverfahren nach Schmigalla ist auf die Ermittlung einer Anordnungslösung mit minimiertem Transportmoment ausgerichtet. Wie bereits beschrieben, wird das Transportmoment nach dem bekannten Vorgehen unabhängig von dem jeweiligen Flächenbedarf bzw. den real entstehenden Entfernungen berechnet. Daraus können sich Abweichungen zu den tatsächlichen Transportmomenten ergeben. Aus diesem Grund gilt es, zunächst ein Anordnungsverfahren mit Betrachtung realer Abstände im Rahmen einer zweireihigen Anordnung zu entwickeln. Anschließend soll dieses Verfahren direkt in eine Simulationssoftware integriert werden.

Durch eine direkte Einbindung in ein Simulationsprogramm kann sofort eine zulässige und optimierte Anfangslösung für die weitere Planung bereitgestellt werden, wenn das DRFLP-Verfahren aufgrund zu hoher Komplexität nicht mehr verwendet werden kann.

#### **4.1.2 Simulationsrelevante Zielsetzungen**

Der Planungsprozess soll mittels Materialflusssimulation unterstützt werden, um dynamische Abläufe, Kapazitäten, etc. absichern zu können. Auch die Analyse hinsichtlich der Flexibilität und des Wandlungsbedarfes von Layouts werden dadurch unterstützt. In den Simulationsmodellen sollen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Bereitstellung einer zulässigen und anordnungsoptimierten Startlösung für die Simulation im Rahmen der Layoutplanung
- Dynamische Absicherung der erforderlichen Kapazitäten
- Bewertungsmöglichkeit von Layouts anhand zu erfassender Kriterien und KPIs<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> KPI (Kurzform für Key-Performance-Indicator) wird auch als Bezeichnung für Leistungskennzahlen verwendet.



- Simulation verschiedener Zukunftsszenarien zur Abschätzung der Flexibilität bei schwankenden Produktionsprogrammen

Darüber hinaus ist es erforderlich, eine hohe Anwenderfreundlichkeit der Gesamtmethodik und der zu verwendenden Simulationsmodelle zu erreichen. Diese wird anhand der zuvor ermittelten Anforderungen und Defizite auf folgende Bereiche bezogen:

- Einfache automatisierte Erstellung von Simulationsmodellen
- Entwicklung relevanter Steuerungselemente
- Zusammenfassung der wesentlichen Funktionen in einer einfachen Bedienoberfläche, um selbst mit geringen Simulationskenntnissen die Modelle nutzen zu können

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, neben der automatisierten Modellerstellung im Rahmen einer Neuplanung, die Nutzung der Simulationsmodelle zur Ermittlung von Potentialen durch eine Änderung des Layouts. Dadurch wird die simulative Analyse des bestehenden Layouts im Vergleich zu einer (idealen) anordnungsoptimierten Lösung während des Betriebes ermöglicht.

#### **4.1.3 Unterstützende Planungsmethoden und -werkzeuge**

Die kombinierte Gesamtmethodik zur Produktionslayoutplanung soll neben partizipativen Planungsansätzen auch den Einsatz weiterer Methoden der Digitalen Fabrik ermöglichen. Insbesondere der interdisziplinäre Charakter der Planung erfordert die Partizipation bei der Layoutgestaltung. Die Planer und Mitarbeiter aus der Produktion müssen durch möglichst leicht zu bedienende Funktionen sowie übersichtlich gestaltete Informationen unterstützt werden. Der Einsatz eines Planungstisches ist dabei auch auf die von der Planung betroffenen Mitarbeiter auszurichten.

Virtual Reality lässt sich für die weitere Abstimmung und Absicherung der Planungsergebnisse einsetzen und soll daher auch in der Gesamtmethodik berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang gilt es zu untersuchen, wie die Kombination von Materialflusssimulation und mathematischer Anordnungsoptimierung mit VR und partizipativen Werkzeugen gekoppelt werden kann. Der Einsatz von partizipativen Werkzeugen und VR soll zudem in die organisatorischen Rahmenbedingungen der Gesamtmethodik eingeordnet werden, wobei Verantwortlichkeiten bzw. beteiligte Mitarbeiter zu adressieren sind (siehe auch Kapitel 4.7).

Für die Gesamtmethodik wird angestrebt, eine möglichst konsequente Nutzung einer Simulationssoftware zu erreichen. Dadurch lassen sich die sonst teilweise notwendigen Konvertierungsvorgänge der Dateien reduzieren und Schnittstellen bzw. die häufig damit verbundenen Informationsverluste vermeiden. Für die praktischen Umsetzungen in dieser Arbeit bedeutet dies, in den nächsten Schritten eine geeignete Software zu bestimmen.

Zur verbesserten und erweiterten Nutzung von Materialflusssimulationen muss neben der Beseitigung der bestehenden Defizite, wie z.B. der hohe Modellierungsaufwand und das erforderliche Expertenwissen, zusätzlich definiert werden, welche weiteren Anforderungen während der Planung vorliegen. Diese beinhalten beispielsweise die gezielte Unterstützung bei der Auswertung von Planungsvarianten und sind in den Modellen zu berücksichtigen.

## 4.2 Vorgehensweise zur Umsetzung

Die festgelegten Ziele aus Kapitel 4.1 bilden die Basis für die Definition der erforderlichen Phasen zur Entwicklung der Gesamtmethodik. Dazu wird zunächst der Rahmen, in dem das Konzept und die Umsetzungen entwickelt werden sollen, definiert und die einzelnen Phasen zur Bewältigung dieser Aufgaben festgelegt.

**Abbildung 31** stellt die zu durchlaufenden Phasen zur Entwicklung einer Gesamtmethodik für die Produktionslayoutplanung, basierend auf der Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung mit der Materialflusssimulation, dar. Den Phasen sind dabei zu generierende Inhalte zugeordnet, die für die Erreichung des vorgegebenen Gesamtziels erforderlich sind.

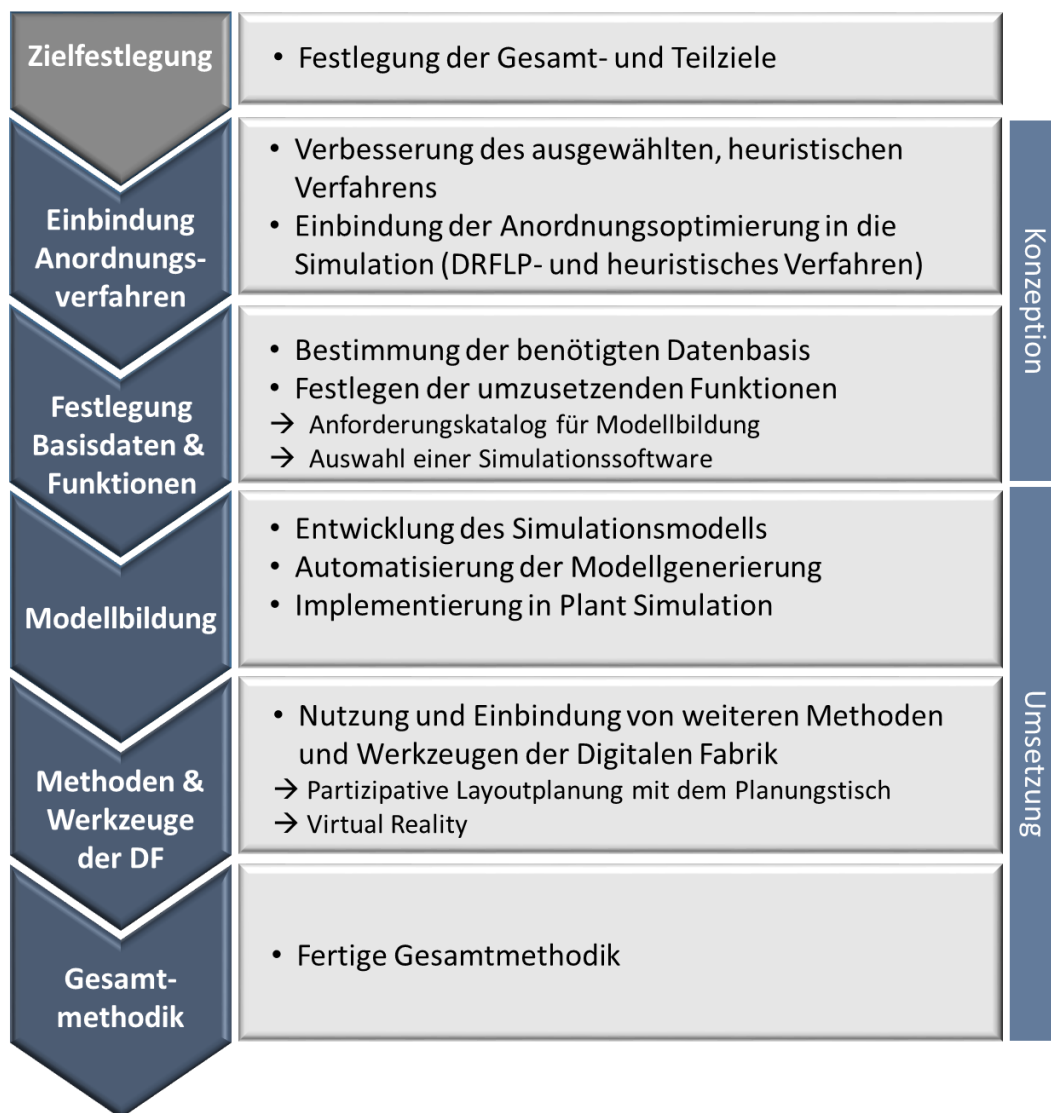


Abbildung 31: Phasen und Inhalte zur Entwicklung der Gesamtmethodik

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Phasen durchlaufen und wichtige Teilergebnisse erarbeitet, um diese zu der Gesamtmethodik zusammenzuführen. Die Phasen mit deren jeweiligen Anforderungen und angestrebten Ergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der mathematischen Anordnungsverfahren im Hinblick auf ihre Einbindung in die Materialflusssimulation. Dabei wird ermittelt, ob eine direkte oder indirekte Verbindung mit einem Simulator angestrebt werden sollte. In dieser Phase erfolgt zudem die Verbesserung eines heuristischen Anordnungsverfahrens zur schnellen Lösung größerer Instanzen.

Anschließend wird in der darauf folgenden Phase die planungs- und simulationsrelevante Datenbasis festgelegt. Zudem erfolgt die Definition der zu

entwickelnden Funktionalitäten und Steuerungen für das Simulationsmodell, welche die Grundlage für die spätere Phase der Modellbildung darstellen. Weiterhin werden die Untersuchungsergebnisse in einem Anforderungskatalog zusammengefasst und ein Simulator für die Umsetzung ausgewählt.

Basierend auf den zuvor erzielten Ergebnissen folgt die Phase der Modellbildung mit dem Ziel, den Anforderungskatalog in einem ausführbaren Simulationsmodell umzusetzen. Dies soll in die Gesamtmethodik zur Kombination von Materialflusssimulation mit der mathematischen Anordnungsoptimierung einfließen. Schließlich gilt es, weitere Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik (z.B. den Planungstisch) zu integrieren.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die in Abbildung 31 vorgestellten Phasen bzw. deren Zielsetzungen bearbeitet.

### **4.3 Einbindung der Anordnungsverfahren in die Simulation**

Die Grundlage für die Kombination der mathematischen Anordnungsoptimierung mit der Materialflusssimulation stellt die Untersuchung dar, wie die Anordnungsergebnisse in einem Simulator eingebunden werden können. Im Folgenden wird ein heuristisches Verfahren weiterentwickelt und ermittelt, wie es sich in der Simulation integrieren lässt. Ebenfalls wird das DRFLP betrachtet und ein Konzept zur Verknüpfung mit der Materialflusssimulation beschrieben.

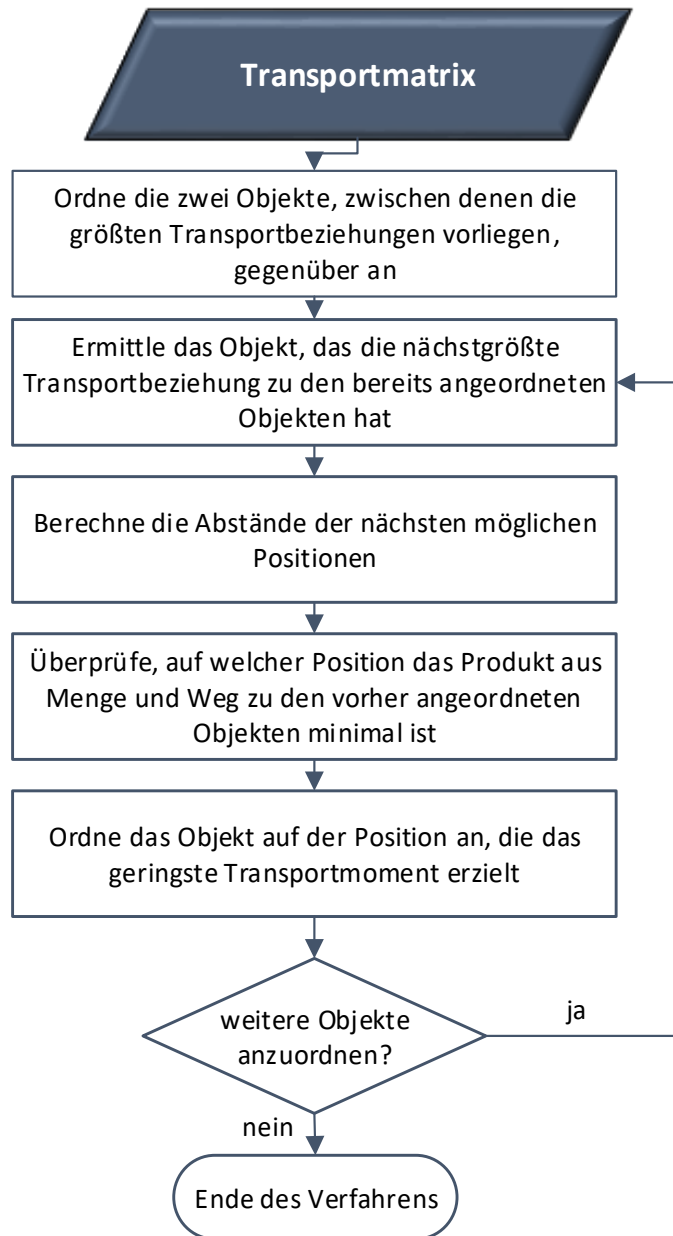
#### **4.3.1 Weiterentwicklung eines heuristischen Anordnungsverfahrens**

Die Weiterentwicklung des heuristischen Anordnungsverfahrens umfasst die Anordnung in zwei Reihen (analog zum DRFLP) unter Betrachtung der realen Distanzen, d.h. bei der Ermittlung der Anordnungslösung mit minimalem Transportmoment werden die paarweise auftretenden Transportwege in horizontaler Richtung (x-Richtung) exakt berechnet.

Zunächst sollen für die Anordnung, wie beim DRFLP-Verfahren, Wegstrukturen vorgegeben werden, d.h. eine Platzierung der Objekte erfolgt in zwei Reihen, zwischen denen der Transportweg liegt. Zudem sollen die real entstehenden Distanzen bei der Anordnung der Objekte zueinander einbezogen werden, da dadurch das zu minimierende Transportmoment stärker bzw. detaillierter berücksichtigt wird. Die Einschränkung auf einfachere, lineare Wegstrukturen wird getroffen, um die grundsätzliche Eignung und den Nutzen einer

weiterentwickelten Heuristik zu untersuchen. Komplexere Planungsprobleme erfordern die Betrachtung weiterer Wegestrukturen (z.B. mit Kreuzungen) und somit auch die Erweiterung der entsprechenden Anordnungsverfahren.

**Abbildung 32** zeigt schematisch den Ablauf des weiterentwickelten Verfahrens.



**Abbildung 32:** Ablauf der Heuristik zur Erzeugung transportoptimierter Startlösungen

Die Datengrundlage für das Anordnungsverfahren bildet, wie in **Abbildung 32** dargestellt, die Transportmatrix. Anhand der größten vorliegenden Transportbeziehungen zwischen zwei Objekten wird die initiale Anordnung vorgenommen. Analog zum modifizierten Dreiecksverfahren nach Schmigalla wird das Objekt mit der nächstgrößten Transportintensität bestimmt. Anschließend

werden alle freien Positionen erfasst und anhand der Flächenbedarfe der bereits angeordneten Objekte die entstehenden Transportdistanzen ermittelt.

Die Anordnung des Objektes wird vorgenommen, nachdem die Position, die von allen möglichen Positionen das minimale Transportmoment erzielt, bestimmt wurde. Das minimale Transportmoment wird aus dem Produkt der Transportdistanz und der Transportintensität gebildet. Diese Schleife wird so oft durchlaufen, bis keine weiteren Objekte mehr anzuordnen sind. Wenn während des Ablaufes mehrere Objekte gleich hohe Transportintensitäten aufweisen, werden diese nach chronologischer Reihenfolge angeordnet. Liegen für die Anordnung mehrere freie Positionen vor, auf denen ein identisches Transportmoment erreicht wird, erfolgt eine Anordnung auf die Position mit dem kürzesten Abstand zum Ursprung. Als freie Positionen sind in diesem Verfahren immer direkt angrenzende Flächen zu den bereits angeordneten Objekten definiert.

Dieses heuristische Anordnungsverfahren erzeugt so lückenlose Anordnungen entlang einer Wegestruktur, d.h. es liegen keine ungenutzten Flächen zwischen den angeordneten Objekten. In gewissen Fällen ist es zu erwarten, dass die optimale Lösung Freiflächen enthält, um die Maschinen mit ihren Be- und Entladepunkten direkt gegenüber zu positionieren und so das minimale Transportmoment zu erreichen. Beim DRFLP hingegen sind Lücken in der Anordnung zulässig.

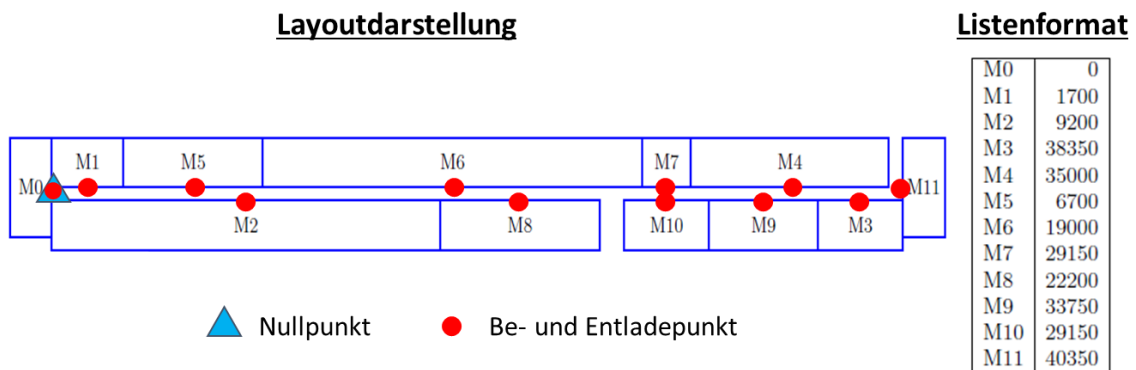
Aufgrund des geringeren Berechnungsaufwands im Vergleich zum DRFLP eignet sich die Heuristik zur direkten Integration in einen Materialflusssimulator. Die Lösung der DRFLP-Modelle wird weiterhin durch die speziellen Solver generiert und anschließend in das Simulationsmodell importiert (indirekte Integration). Die programmiertechnische Umsetzung für die Ermittlung der anordnungsoptimierten Lösung auf Basis der Heuristik kann durch den Simulator ausgeführt werden. Ein Import von Ergebnisdaten aus weiteren Programmen zur Lösung dieses Verfahrens ist nicht erforderlich.

#### **4.3.2 Kombination des DRFLP mit der Simulation**

Neben der weiterentwickelten Heuristik, die direkt in der Simulation hinterlegt wird, sollen die DRFLP-Lösungen eingebunden werden. Der Anwender kann dadurch planungsspezifisch das für die Simulation einzusetzende Anordnungsverfahren auswählen. Dadurch kann beispielsweise in Abhängigkeit von der Problemgröße (d.h. der Anzahl der anzuordnenden Objekte) individuell entschieden werden, ob die Heuristik oder das DRFLP einzusetzen ist. Die (teils) aufwändigen Berechnungen des DRFLP-Verfahrens dafür werden jedoch nicht direkt in Plant Simulation, sondern in dem dafür vorgesehenen Solver durchgeführt. Aufgrund der standardisierten Importmöglichkeiten von Listen in

Form von Text-, Excel- oder XML-Dateien der Simulatoren bietet es sich an, die DRFLP-Anordnung als Datensatz in Listenform zu verwenden.

Die Ausgabe der Lösungen wurde von den Projektpartnern aus dem Fachbereich Mathematik zielgerichtet weiterentwickelt, sodass der Solver nach Abschluss der Berechnungen die Ergebnisse als Layout und als Liste mit den Positionen der Objekte speichert. DRFLP-Anordnungen werden als schematische Darstellung eines Layouts wiedergegeben, um einen ersten Überblick zu ermöglichen. **Abbildung 33** zeigt beispielhaft eine ermittelte DRFLP-Lösung.



**Abbildung 33: Darstellung einer optimalen DRFLP-Anordnungslösung für den Datenaustausch mit dem Simulator**

Die in der Liste ausgegebenen Positionen der Objekte können in Verbindung mit den Bezeichnungen aus der linken Spalte durch den Simulator verarbeitet werden. In der rechten Spalte werden die Distanzen (Einheit: mm) der Be- und Entladepunkte ab dem Nullpunkt angegeben. Im dargestellten Beispiel liegen diese Angriffspunkte in der Mitte der Objekte. Bei einer getrennten Betrachtung für die Be- und Entladung der Maschinen oder Anlagen werden diese in zwei separaten Spalten dargestellt, um sie in der Simulation berücksichtigen zu können.

## 4.4 Bestimmung der erforderlichen Basisdaten und Funktionen

Für die Planung und die simulative Abbildung von Produktionslayouts wird ein breites Spektrum an Daten benötigt, das je nach Planungsfall und Planungsphase unterschiedliche Detaillierungsgrade aufweist. Es ist erforderlich, die im Planungsprozess benötigten simulationsgestützten Funktionen festzulegen und schließlich in einem Anforderungskatalog zur späteren Modellbildung zusammenzufassen. Es sind ebenfalls bereits für die spätere Simulation während

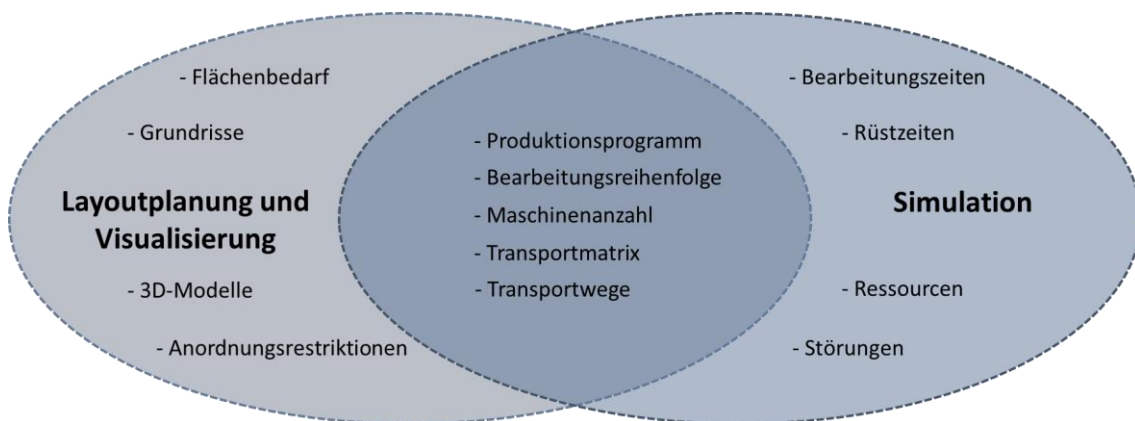
des realen Betriebes relevante Daten festzulegen, um diese während der Modellbildung in geeigneter Weise zu berücksichtigen und zu verarbeiten.

#### 4.4.1 Basisdaten für die Planung und Simulation

Die Grunddaten für die Planung, den Betrieb und die Überführung von bestehenden Bereichen in Simulationsmodelle lassen sich grob in folgende Kategorien unterteilen:

- Layoutplanungs- und visualisierungsbezogene Daten
- Simulationsbezogene Daten

Es gibt eine große Schnittmenge zwischen den beiden Kategorien, so dass nur die spezifischen Daten, wie in der nachfolgenden **Abbildung 34** beispielhaft dargestellt, zugeordnet werden.



**Abbildung 34: Klassifizierung der erforderlichen Basisdaten für die kombinierte Gesamtmethodik**

Die Layoutplanung basiert auf flächen- und raumbezogenen Grunddaten, die aufgrund bestimmter Anordnungsrestriktionen miteinander verbunden sind. Aufgabe der Visualisierung ist die übersichtliche und leicht verständliche Darstellung der Layouts. Dafür werden zweidimensionale oder dreidimensionale Modelle verwendet, wobei die Produktionsabläufe z.B. mittels Simulationen oder mit VR-Umgebungen dynamisch dargestellt werden können. Wichtige layout- und visualisierungsbezogene Daten sind daher:

- Flächenbedarf und Grundrisse
- Anordnungsrestriktionen und Planungsvorgaben
- 2-D und 3-D Modelle von Anlagen, Maschinen oder Bereichen

Basisdaten für die Durchführung von Ablaufsimulationen beziehen sich insbesondere auf Zeiten, Verteilungen und weitere stochastische Einflussgrößen



(wie z.B. Störungen). Diese liegen je nach Planungsfall (Neuplanung oder Umplanung) entweder bereits vor oder können zunächst aufgrund von Berechnungen oder Erfahrungswerten angenommen werden.

Bei der Nutzung der Simulationsmodelle für die Analyse von Flexibilität und Wandlungsbedarf der Layouts bei sich ändernden Produktionsanforderungen sind diese Daten regelmäßig auf Basis realer Werte zu aktualisieren. Für die Simulation sind daher folgende Informationen zugrunde zu legen:

- Zeiten für Bearbeitungs-, Rüst- und Wartungsvorgänge
- Verfügbarkeit von Ressourcen (Maschinen, Werker, Transportmittel, usw.)
- Störungswahrscheinlichkeiten und Ausfallzeiten

Die Schnittmenge der Basisdaten aus den Kategorien Layoutplanung und Simulation werden in **Tabelle 2** aufgeführt und erläutert.

**Tabelle 2: Gemeinsame Basisdaten für Simulation und Layoutplanung**

Basisdaten	Erläuterung
<b>Maschinen/Bereiche</b>	Typ und Anzahl der eingeplanten Maschinen/Bereiche, die simulativ abgebildet werden sollen
<b>Transportmatrix</b>	Darstellung der Transportbeziehungen zwischen den Maschinen oder Bereichen (Grundlage für die Anordnungsoptimierung)
<b>Produkte</b>	Anzahl und Typ der unterschiedlichen Produkte, die basierend auf ihren spezifischen Bearbeitungsreihenfolgen hergestellt werden
<b>Produktionsprogramm</b>	Vorgabe von Mengen und Zeitpunkten, zu denen die zu produzierenden Produkte im System bearbeitet werden
<b>Bearbeitungsreihenfolge</b>	Abfolge der Bearbeitungsschritte über mehrere Maschinen oder Bereiche für jedes zu produzierende Produkt
<b>Transportressourcen</b>	Welche Transportmittel stehen zur Verfügung? (Typ, Anzahl, Geschwindigkeit, Verfügbarkeit, usw.)
<b>Kapazitäten</b>	Dimensionen von Lagern, Puffern, Anlagen, Maschinen, usw.

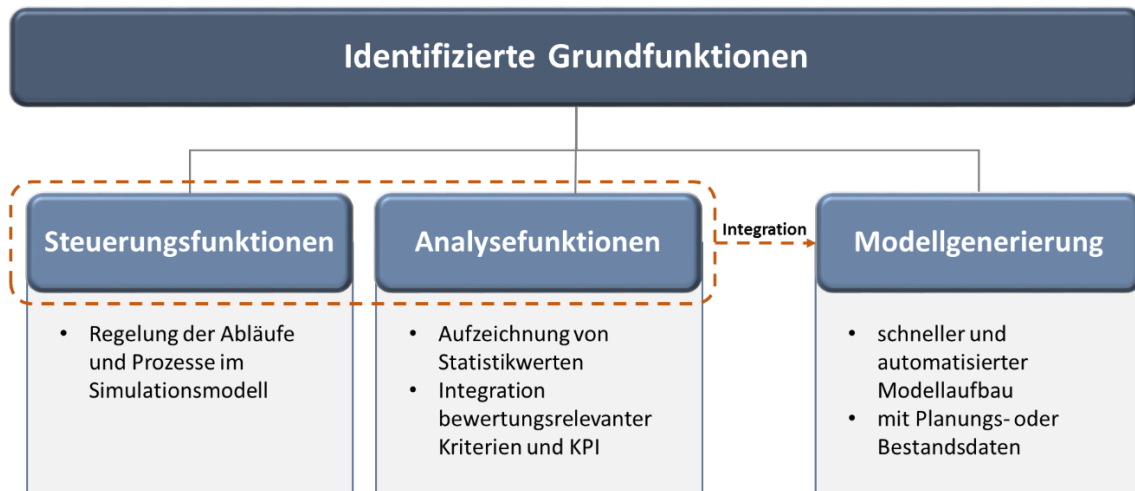
Die aufgezählten Basisdaten für die Planung stellen auch gleichzeitig Eingabedaten und Parameter für die Simulation dar, woraus während eines Simulationslaufes Ergebnisdaten bzw. Analysegrößen generiert werden.

#### 4.4.2 Festlegung der erforderlichen Simulationsfunktionen

Während der Planung müssen in der Simulationssoftware zur Verarbeitung der zugrunde liegenden Daten und zur Unterstützung des Planungsprozesses, gewisse

Funktionen bereitgestellt werden. In dieser zweiten konzeptionellen Phase (siehe Abbildung 31) sind auch die erforderlichen Grundfunktionen festzulegen. Diese werden bei der Modellbildung bzw. Implementierung softwarespezifisch umgesetzt.

Die notwendigen Funktionen lassen sich grob in drei Teilbereiche unterteilen. **Abbildung 35** stellt die identifizierten Teilbereiche dar und zeigt deren Zusammenwirken im zu entwickelnden Gesamtmodell.



**Abbildung 35: Klassifizierung der identifizierten Grundfunktionen**

Die Grundfunktionen können in die Klassen Steuerung, Analyse und Modellgenerierung eingeteilt werden. Steuerungsfunktionen werden zur Regelung der im Modell abzubildenden Abläufe benötigt. Sie bilden, zusammen mit den Analysefunktionen zur statistischen Erfassung und Bewertung der Ergebnisse, die Grundlage für die Generierung des Simulationsmodells zur Abbildung der Anordnungslösung.

### **Steuerungs- und Analysefunktionen – Anforderungen und Einflüsse**

Alle fertigungsbezogenen Informationen werden im Modell mit den Produkten gekoppelt und ermöglichen die Steuerung der Produktionsvorgänge. In der Simulation können diese Informationen mit Hilfe von Attributen direkt mit dem jeweiligen Produkt verknüpft werden.

Bei der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen werden unter anderem entscheidungsrelevante Kosten berücksichtigt. Diese beziehen sich z.B. auf die Lagerhaltung, das Überziehen von Lieferterminen oder auf die Vorbereitung und den Stillstand von Produktionsanlagen (Rüst- und Stillstandskosten) (Kurbel 2003, S. 20). Genaue und vollständige Informationen liegen jedoch selten vor, sodass zeit- und mengenbezogene Ersatzzielgrößen verwendet werden, die mit den

Kosten in Zusammenhang stehen. Beispielhaft sind nach (Kurbel 2003, S. 20) folgende Zielsetzungen bei der Planung möglich:

- Minimierung der Durchlaufzeit
- Maximierung der Kapazitätsauslastung
- Minimierung von Lagerbeständen innerhalb und außerhalb der Produktion

Diese Ziele sind jedoch nicht unabhängig voneinander sondern beeinflussen sich gegenseitig bzw. stehen miteinander in einem Zielkonflikt (Kurbel 2003, S. 21), wie z.B. die Erhöhung der Kapazitätsauslastung und die Minimierung der Bestände. Eine höhere Auslastung erfordert i.d.R. das Vorhalten größerer Bestände an Rohstoffen, Halbzeugen oder Verbrauchsmaterialien, um ausreichend Material für die Produktion bereitstellen zu können. Für die Bewertung von Layouts und Produktionssystemen anhand der planungsbezogenen Zielsetzungen müssen daher geeignete Daten ermittelt werden.

Im Sinne einer objektiven Bewertung und Interpretation von Lösungsvarianten muss daher im Rahmen der Analysefunktionen festgelegt werden, welche weiteren Statistikwerte und KPIs (z.B. Durchlaufzeit, Transportwege, etc.) während der Simulation zu erfassen sind. Eine nähere Darstellung erfolgt in Kapitel 4.4.2.2. Auf Basis der simulativ ermittelten Daten lassen sich Lösungsalternativen auswählen oder weiterer Planungs- und Optimierungsbedarf identifizieren.

### **Funktionen zur Modellgenerierung – Anforderungen und Einflüsse**

Ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz von Materialflusssimulation sind, wie zuvor bereits beschrieben, die zeitintensive Modellerstellung, das erforderliche Expertenwissen und hohe Kosten. Um diesen Faktoren entgegenzuwirken, soll ein Ansatz zur automatisierten Modellerstellung für layoutbasierte Simulationen entwickelt werden. Eine wichtige Zielsetzung der Funktionen stellt also die Modellgenerierung dar.

#### **4.4.2.1 Funktionen zur Steuerung der Abläufe**

Eine Hauptaufgabe der Steuerungsfunktionen ist die Regelung der Produktionsabläufe während eines Simulationslaufes. Mit Bezug auf die bereits definierten Basisdaten muss durch die Steuerungsfunktionen festgelegt werden, wie diese im Hinblick auf die Zielstellung zu verarbeiten sind.

Die nachfolgende **Tabelle 3** gibt einen Überblick über zu realisierende Funktionen mit einer kurzen Erläuterung.

**Tabelle 3: Übersicht der Steuerungsfunktionen**

Steuerungsfunktion	Erläuterung
<b>Fertigungssteuerung</b>	Einbindung von unterschiedlichen Grundformen der Fertigungssteuerung wie dem Pull-Prinzip
<b>Bearbeitungsreihenfolge</b>	Einhaltung vorgegebener Bearbeitungssequenzen der einzelnen Produkte
<b>Zielsteuerung</b>	Die Zielsteuerung dient der Umlagerung bzw. dem Transport von Produkten zum nächsten Objekt, durch das ein weiterer Bearbeitungs- bzw. Produktionsschritt vollzogen wird.
<b>Verteilstrategien</b>	Verteilstrategien regeln das Verhalten des Systemes, z.B. wenn ein Produkt durch einen bestimmten Maschinentyp bearbeitet werden muss, der mehrmals vorliegt. Beispiele für Verteilstrategien sind gezielte Umlagerungsvorgänge um gleichmäßigere Auslastung zu erzielen, Transportwege zu reduzieren oder Rüstzeiten zu verringern.
<b>Vermittlung von Transportdiensten</b>	Transportdienste müssen im Materialflusssystem anforderungsbezogen bereitgestellt werden. Diese Steuerung regelt die Transportprozesse, z.B. wenn die Halbzeuge und Produkte unterschiedliche Transportmittel erfordern (Stapler, Kran, usw.).
<b>Regelung von Bearbeitungs- und Rüstzeiten</b>	Neben der Zielsteuerung der Produkte ist es erforderlich, dass die Bearbeitungsdauern und Rüstzeiten für die jeweiligen Produkte auf den Bearbeitungsstationen eingestellt werden.

Die in der Tabelle beschriebenen Steuerungsfunktionen müssen während der automatisierten Modellgenerierung mit allen relevanten Materialflussobjekten verknüpft werden. Dabei ist zu beachten, dass alle Steuerungen zu den richtigen Zeitpunkten ausgelöst werden, um zu gewährleisten, dass alle Prozesse realitätsgetreu wiedergegeben werden. Neben den tabellarisch aufgeführten Steuerungsfunktionen sollen die Produktionsaufträge nach dem Pull-Prinzip in der Simulation bearbeitet werden, um beispielsweise die grundlegende Forderung nach geringen Beständen zu berücksichtigen.

#### 4.4.2.2 Analysefunktionen

Analysefunktionen sind zur Auswertung von untersuchungsrelevanten Daten erforderlich. Diese müssen während eines Simulationslaufes aufgezeichnet, weiterverarbeitet und nach dem Simulationsende übersichtlich dargestellt werden. Anhand der Simulationsergebnisse lassen sich so Bewertungen zur Leistungsfähigkeit und Effizienz der Logistikprozesse und des Layouts durchführen.

Die Bewertung und Auswahl von im Planungsprozess entwickelten Layoutlösungen hat einen großen Einfluss auf die Qualität des Planungsergebnisses (Pawellek 2014, S. 53). Bewertungskriterien und Kennzahlen zur Beurteilung von verschiedenen Planungsvarianten kommen in quantitativer und qualitativer Form zum Einsatz (Pawellek 2014, S. 50, S.53). Anhand der Planungsziele sind diese miteinander in Relation zu setzen.

Mit der Simulation soll vor allem die Untersuchung der dynamischen Aspekte quantitativ unterstützt werden. Da die Anordnungsoptimierung mit dem Ziel der Minimierung des Transportaufwandes einen wesentlichen Bestandteil darstellt, sind in der Simulation folgende Werte zu erfassen:

- Transportdistanzen (für jeden Produkttyp)
- Transportmoment (Gesamt und für jeden Produkttyp)
- Zurückgelegte Distanzen der Transportmittel

Darüber hinaus werden folgende kostenrelevante Größen und Leistungsfaktoren des Materialflusssystems während eines Simulationslaufes quantitativ bestimmt:

- Durchlaufzeiten der Produkttypen
- Auslastung von Maschinen und Anlagen
- Auslastung der Transportmittel
- Lagerbestände
- Bestände innerhalb der Produktion
- Belegung von Pufferplätzen

Aber auch zusätzliche Kriterien, wie z.B. die Flexibilität bei der Bewältigung wechselnder Produktionsprogramme können durch die Simulationsergebnisse besser beurteilt werden.

Bei der weiteren Bewertung der Layouts werden zusätzliche Kriterien (Flächennutzungsgrade und qualitative Aspekte) einbezogen, die nicht zwangsläufig aus den Simulationsergebnissen hervorgehen, sondern aus der räumlichen Anordnung abgeleitet werden können. Diese beziehen sich unter anderem auf die Ergonomie, das Arbeitsumfeld und die Transparenz.

#### **4.4.2.3 Automatisierte Modellgenerierung**

Funktionen der Modellgenerierung sind erforderlich, um die Grundelemente (z.B. Maschinen oder Ressourcen), die zugehörigen Basisdaten sowie Steuerungs- und Analysefunktionen in ein lauffähiges Simulationsmodell zu transformieren. Die

Generierung der Modelle soll automatisiert erfolgen. Um dies zu realisieren, müssen Grundstrukturen geschaffen werden, die durch Funktionen der Modellgenerierung verarbeitet werden können. Für die Basisdaten bedeutet das, dass eine gewisse Systematik bei der Formatierung der unterschiedlichen Datensätze eingehalten werden muss, damit diese in einer programmierten Steuerung für die Implementierung von Simulationsmodellen handhabbar sind.

Bei der Modellerzeugung werden folgende Punkte systematisch aufbereitet und umgesetzt:

- Erzeugung der Maschinen, Anlagen oder Bereiche im Simulationsmodell
- Nachbildung des Layouts
- Integration der Wegestrukturen
- Erzeugung der Transportmittel
- Anlegen einer Bibliothek der zu fertigenden Produkte
- Dynamische Parametrisierung der Maschinen in Abhängigkeit von den zu bearbeitenden Produkten
- Verknüpfung der Steuerungsfunktionen mit den entsprechen Materialflussobjekten

Die dafür benötigten Informationen lassen sich einfach und übersichtlich in Tabellen speichern. Im Unterkapitel zur Modellbildung wird deren spezifische Strukturierung zur Verwendung mit einem ausgewählten Simulationsprogramm kurz beschrieben.

#### **4.4.2.4 Anforderungskatalog für die Modellbildung**

Die festgelegten Basisdaten und deren Verarbeitung im Simulationsmodell durch Steuerungen und Funktionen lassen sich zu Anforderungen für die Modellbildung in einem Anforderungskatalog formulieren und zusammenfassen. Dieser wird für die Modellbildung und Implementierung zugrunde gelegt. In **Tabelle 4** wird der Anforderungskatalog beschrieben.

Tabelle 4: Anforderungskatalog für die Modellbildung und Implementierung im Rahmen der Gesamtmethodik

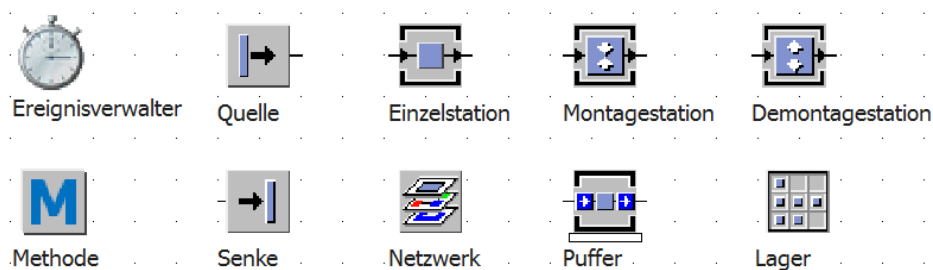
Anforderungskatalog für die Modellbildung	
Umsetzungsgegenstand	automatisierte Generierung von Simulationsmodellen zur Unterstützung der Anordnungsoptimierung, Layoutplanung und Produktionssteuerung
Verwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erzeugung von zulässigen/optimierten Startlösungen</li> <li>- Optimierung und Absicherung der Planung von Produktionslayouts</li> <li>- Überführung von bestehenden Bereichen in Simulationsmodelle</li> <li>- Unterstützung der Planung während des laufenden Betriebes</li> </ul>
Anforderungen	
1. automatisierte Generierung von Simulationsmodellen auf Basis von Planungs- oder Bestandsdaten	
2. Simulationsmodellinterne Erzeugung einer zulässigen, materialflussoptimierten Startlösung	
3. Import mittels DRFLP-Verfahren erzeugter Layouts	
4. Steuerung der Produktionsabläufe unter Berücksichtigung von:	
- Zielsteuerung	- Verteilungsstrategien
- Fertigungssteuerungsprinzipien	- Transportmitteln
- Wegestrukturen	- Bearbeitungsreihenfolgen
- Bearbeitungs- und Rüstzeiten	- Produktionsprogramm
5. Erfassung von bewertungsrelevanten Daten:	
- Durchsatz	- Durchlaufzeit
- Bestand	- Auslastung der Ressourcen
- zurückgelegte Distanzen der Produkte	- gefahrene Distanz der Transportmittel
- Transportmoment (pro Teil & Gesamt)	- Flächennutzungsgrad
6. Übersichtliche Darstellung der Layouts in 2D oder 3D	
7. Unterstützung von partizipativer Planung und VR	

Vor Durchführung der Modellbildung und –implementierung wird ein Simulator ausgewählt. Anhand des Anforderungskataloges lässt sich bestimmen, ob eine Simulationssoftware zur Umsetzung dieser Punkte geeignet ist.

#### 4.4.2.5 Auswahl der Simulationssoftware

Zur Abbildung der Abläufe, Logistikprozesse und Materialflüsse in Produktionslayouts ist die Ablaufsimulation aus den in Kapitel 2 beschriebenen Gründen ideal geeignet. Daher kann die Auswahl des Simulators grundsätzlich auf ereignisorientierte Softwarelösungen eingeschränkt werden.

Plant Simulation von Siemens PLM Software ist ein weit verbreitetes Simulationsprogramm, dessen Bedeutung u.a. durch den breiten Einsatz in der Automobilindustrie und die Entwicklung des VDA-Bausteinkastens<sup>25</sup> unterstrichen wird (Arnhold 2013, S. 73; Mayer und Pöge 2010, S. 29–30). Der Simulator ist objektorientiert und bietet ein Spektrum an Grundbausteinen und Standardelementen, die bei der Modellerstellung verwendet werden können. Die nachfolgende **Abbildung 36** gibt einen Überblick über ausgewählte Standardelemente und Bausteine.



**Abbildung 36: Standardelemente und Bausteine von Plant Simulation**

Die Standardbausteine in Plant Simulation bilden wichtige Grundfunktionen und Objekte von Materialflusssystemen ab. Darüber hinaus können, wenn die Funktionen der vorgegebenen Bausteine nicht zur Abbildung der Prozesse ausreichen, über „Methoden“ weitere Modellierungen des Objekt- und Systemverhaltens vorgenommen werden. Methoden werden mit der Skriptsprache SimTalk programmiert und helfen, die Detaillierungs- und Anpassungsmöglichkeiten zu steigern (Arnhold 2013, S. 73).

Weitere Aspekte der Verwendung dieser Software für die Modellimplementierung stellen die Anwendung im VR-Labor und die Verfügbarkeit von Software Plug-Ins zur Erweiterung der klassischen Interaktionsmöglichkeiten dar. Im Vorfeld der Untersuchungen und der Implementierung wurde bereits die Darstellbarkeit der Simulationssoftware im VR-Labor des IMAB abgesichert.

<sup>25</sup> Der VDA-Bausteinkasten ist eine speziell für die Automobilindustrie entwickelte Bausteinbibliothek und wird als Standard für die Simulationsmodellerzeugung im Wirkungskreis des Automobilbaus angesehen (Mayer und Pöge 2010, S. 35).



## 4.5 Entwicklung eines Simulationsbasismodells

Basierend auf den Ergebnissen der Zielfestlegung und des Anforderungskataloges erfolgt zunächst die Definition der Systemgrenzen und der zu modellierenden Teilsysteme, die Modellformalisierung und abschließend die Umsetzung in Plant Simulation.

### 4.5.1 Festlegung der Systemgrenzen und Teilsysteme des Modells

Das Konzeptmodell beinhaltet die Modellierung der Systemstruktur, deren Teilsysteme und der übergreifenden Steuerungsmechanismen. Ein weiterer Aspekt ist dabei auch die Festlegung auszutauschender oder gemeinsam genutzter Ressourcen. In diesem Schritt werden auch grundsätzliche Anforderungen zum Datenaustausch in einem größeren Detaillierungsgrad festgelegt. Weiterhin werden Systemgrenzen definiert und die auszutauschenden Eingabe- und Ergebnisdaten festgelegt. **Abbildung 37** zeigt das Zusammenwirken der identifizierten Teilsysteme, die Systemgrenzen sowie die Eingabe- und Ergebnisdaten. Die Systemgrenzen werden durch die Stellen definiert, an denen Eingangsprodukte in das System gelangen (Quelle) und die Bearbeitung von Endprodukten, inklusive Abtransport, abgeschlossen wird (Senke).

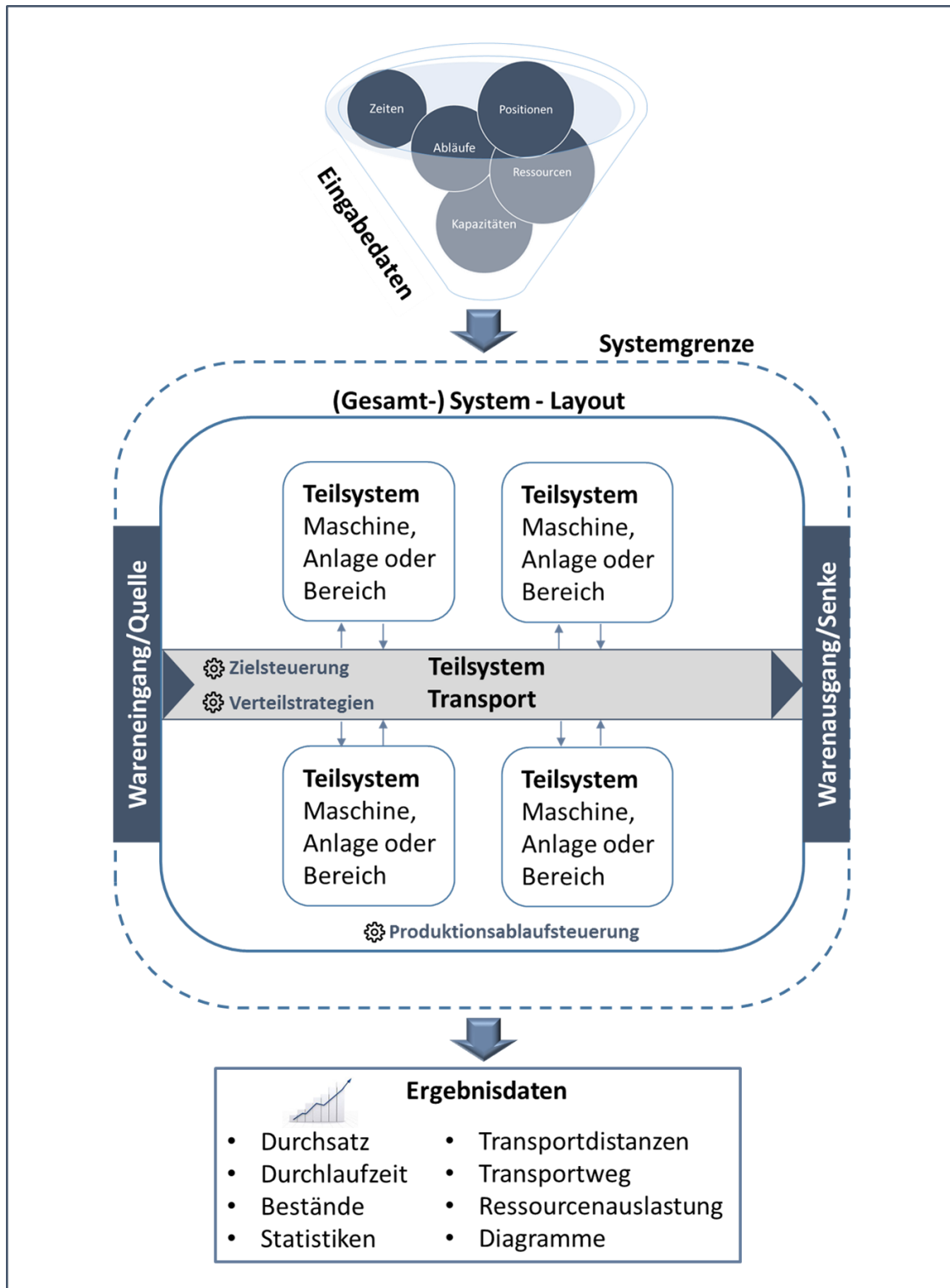


Abbildung 37: Systemgrenzen, zu modellierende Teilsysteme und zu verarbeitende Daten

Die Systemstruktur wird in mehrere Stufen unterteilt. Ein Produktionslayout mit allen enthaltenen Systemelementen stellt das Gesamtsystem dar. Eine Unterteilung der (Teil-)Systeme erfolgt in drei verschiedene Kategorien:

1. **Layout als Gesamt- bzw. Teilsystem:** umfasst alle weiteren Teilsysteme, die zur Abbildung eines Layouts in der Simulation benötigt werden
2. **Transportsystem:** ist verantwortlich für die Bewegung der Produkte im Gesamtsystem (Layout)
3. **Maschinen, Anlagen, Bereiche als Teilsystem:** die Auswahl erfolgt auf Basis des Detaillierungsgrades in der Planung. Diese Teilsysteme lassen sich weiter nach ihren Kernaufgaben unterscheiden:
  - **Montagefunktion:** Aufgabe des Teilsystems ist das Zusammenfügen von zwei oder mehreren Erzeugnissen auf Basis eines vorgegebenen Mengenverhältnisses mit einer spezifisch festgelegten Bearbeitungszeit.
  - **Bearbeitungsfunktion:** Das Teilsystem nimmt ein Erzeugnis auf und gibt dieses nach einer spezifisch festgelegten Bearbeitungszeit an nachgelagerte Prozesse/Teilsysteme weiter.
  - **Demontagefunktion:** Invers zur Montage wird dieses Teilsystem verwendet, um ein Erzeugnis in einem spezifisch vorgegebenen Mengenverhältnis in seine Bestandteile zu zerlegen und diese an nachgelagerte Teilsysteme weiterzuleiten.

Das Zusammenwirken der Teilsysteme wird durch Steuerungen geregelt. Produktionssteuerungen umfassen dabei die Einlastung von Aufträgen und die Regelung von Bearbeitungsabfolgen. Die Einhaltung der Bearbeitungsabfolgen wird wiederum im Zusammenspiel mit den Zielsteuerungen und Verteilstrategien gewährleistet. Gemäß den noch durchzuführenden Bearbeitungsschritten sucht die Zielsteuerung den passenden Nachfolger aus. Liegen mehrere mögliche Nachfolger vor, wird die Zuordnung auf Basis ausgewählter Verteilstrategien gesteuert.

Dem Modell liegen die in Kapitel 4.4.1 vorgegebenen Eingangsdaten zugrunde. Diese sollen in Form von Listen bzw. Tabellen in das Simulationsmodell geladen werden. Steuerungen be- und verarbeiten diese Daten bei der Parametrisierung von Teilsystemen, beim Anlegen von Elementen in einer Klassenbibliothek sowie bei der Durchführung eines Simulationslaufes.

Anhand der den zu bearbeitenden Produkten zugewiesenen Attribute, wie Produkttyp und Bearbeitungsstand, greifen die Zielsteuerungen und Produktionssteuerungen auf die entsprechenden Informationen aus den Listen zu, um die Bearbeitungsreihenfolge mit den jeweils zugehörigen Zeiten in den Teilsystemen zu regeln.

Die Teilsysteme, die Maschinen, Anlagen oder Bereiche abbilden und durch ihre Montage-, Bearbeitungs- oder Demontagefunktionen gekennzeichnet sind, stellen wiederverwendbare Komponenten dar, die einen modularen Einsatz ermöglichen. Auch das Transportsystem zählt zu den wiederverwendbaren, modularen Komponenten, die in einem automatisierten Modellaufbau eingesetzt und gemäß den importierten Daten konfiguriert werden. Dadurch können fallspezifisch Simulationsmodelle automatisiert generiert werden.

Ein als Gesamtsystem erstelltes Simulationsmodell eines Layouts kann wiederum ein Subsystem bzw. ein Modul einer Fabrik oder eines Produktionsbereiches darstellen, wenn die Systemgrenzen einen Übergang zum übergeordneten System oder weiteren Teilsystemen aufweisen.

#### **4.5.2 Modellformalisierung**

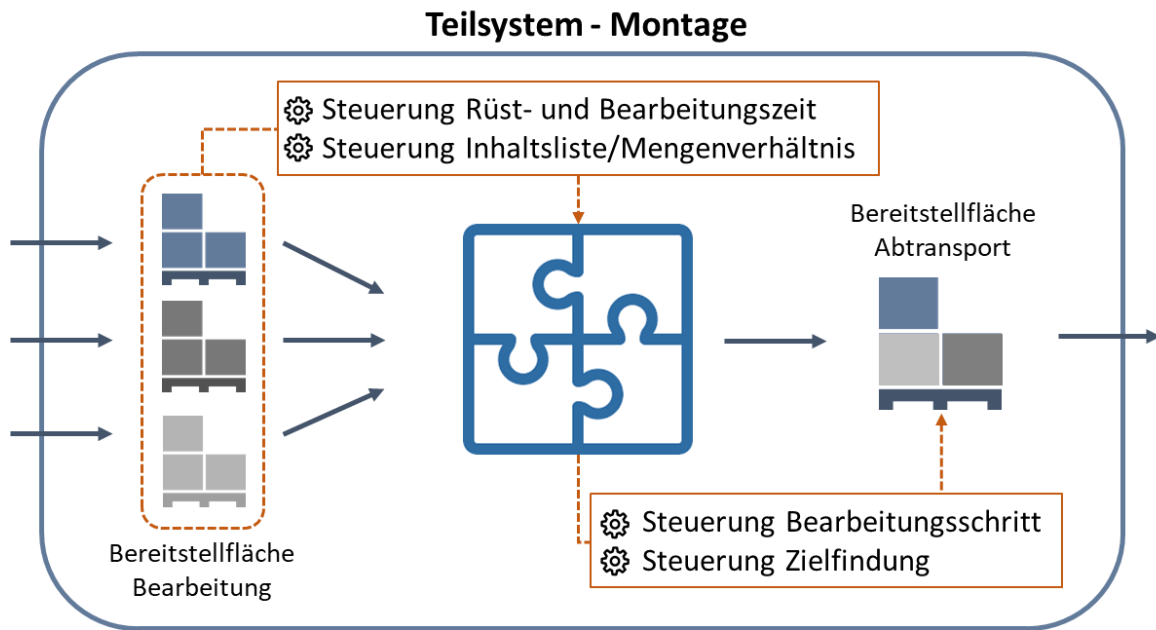
Zur Implementierung eines lauffähigen Simulationsmodells muss zunächst eine weitere Formalisierung des Modells erfolgen. Zunächst werden daher die Teilsysteme näher spezifiziert und deren Grundaufbau definiert. Nachdem alle Grundanforderungen an das Gesamt- und die Teilsysteme beschrieben wurden, erfolgt die Formalisierung nach dem Bottom-up<sup>26</sup>-Ansatz, damit alle für die Steuerung der kleinsten Einheiten erforderlichen Aspekte direkt in den übergeordneten Strukturen einbezogen und nicht nachträglich eingebunden werden müssen. Daher werden zunächst die Teilsysteme zur Abbildung von Maschinen, Anlagen oder Bereichen weiter formalisiert. Anschließend wird auf das Transportsystem und den übergeordneten Modellaufbau eingegangen.

##### **4.5.2.1 Formalisierung der Teilsysteme nach Kernaufgaben**

In diesem Abschnitt werden die Teilsysteme zur Erfüllung von Montage-, Bearbeitungs- und Demontagefunktionen näher betrachtet. Die nachfolgende **Abbildung 38** zeigt das formale Modell eines Montagesystems.

---

<sup>26</sup> Der Bottom-up-Ansatz beschreibt die Vorgehensweise zur Gliederung von Systemen nach dem Prinzip „vom Feinen zum Groben“.



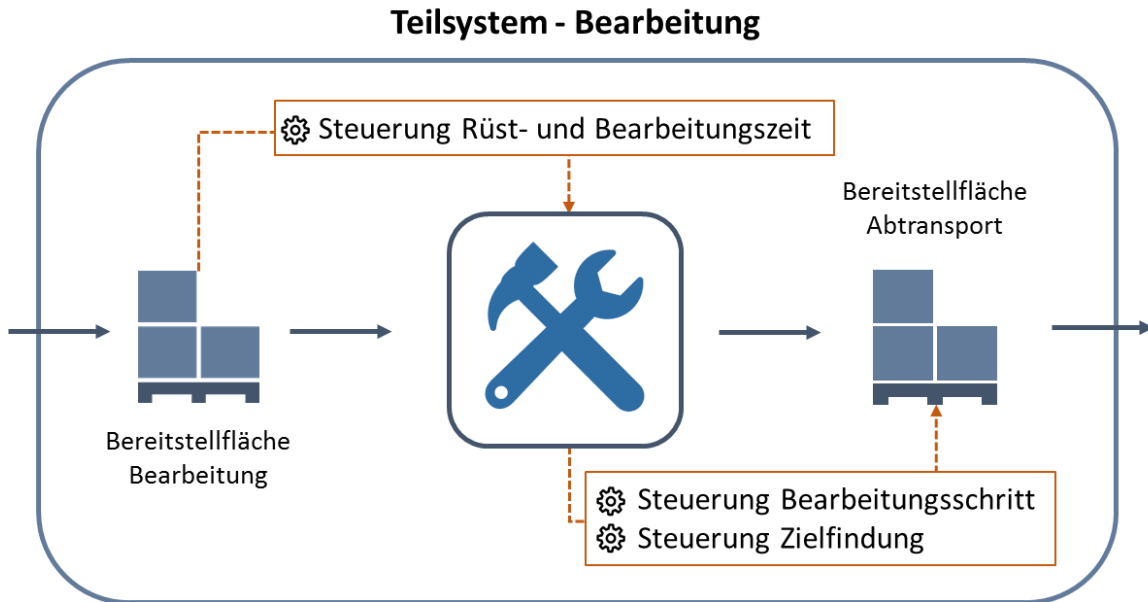
**Abbildung 38: Formales Modell eines Montagesystems**

Das Montagesystem besteht aus drei Komponenten und vier Steuerungen. Es beinhaltet Bereitstellflächen vor und nach der Montagestation. Die Übergänge an den Systemgrenzen werden benötigt, um die Erzeugnisse aus dem übergeordneten System auf die Bereitstellfläche vor der Montage umzulagern und anschließend wieder aus dem Teilsystem auszulagern. Hierbei liegt eine  $n : 1$  ( $n \geq 2$ ) Relation vor, d.h. es gibt mindestens zwei Vorgänger (Eingangserzeugnisse) und nur einen Nachfolger (Weitergabe des montierten Produktes) der Montagestation.

Die Steuerungen am Übergang von den eingehenden Bereitstellflächen zur Montagestation regeln das Mengenverhältnis und übergeben Informationen zu den benötigten Bearbeitungszeiten sowie der Rüstzeit<sup>27</sup>, bevor die Montage beginnen kann. Nach Beenden des Montageprozesses werden die Steuerungen Bearbeitungsschritt und Zielfindung ausgeführt, um dem Produkt die erforderlichen Attribute zuzuweisen und eine Transportanforderung an das Transportsystem zu senden. Informationen, die bei der Ausführung der Steuerungen zu verarbeiten sind, befinden sich zentral auf der höchsten Ebene des Gesamtsystems und werden vor dem automatisierten Modellaufbau importiert. Die Interaktion mit dem Transportsystem erfolgt auch bei den Teilsystemen Bearbeitung und Demontage nach demselben Prinzip.

<sup>27</sup> Die Rüstzeit beschreibt den Zeitaufwand zur Vorbereitung des Arbeitsprozesses (z.B. Wechsel der Werkzeuge und Aufnahmen in Maschinen)

Im Bearbeitungssystem liegt im Gegensatz zum Montagesystem eine 1 : 1 Relation vor. Über die Systemgrenze wird ein Erzeugnis zur Bearbeitung weitergeleitet und anschließend wieder ausgelagert. Nachfolgend stellt **Abbildung 39** den formalen Aufbau des Bearbeitungssystems dar.

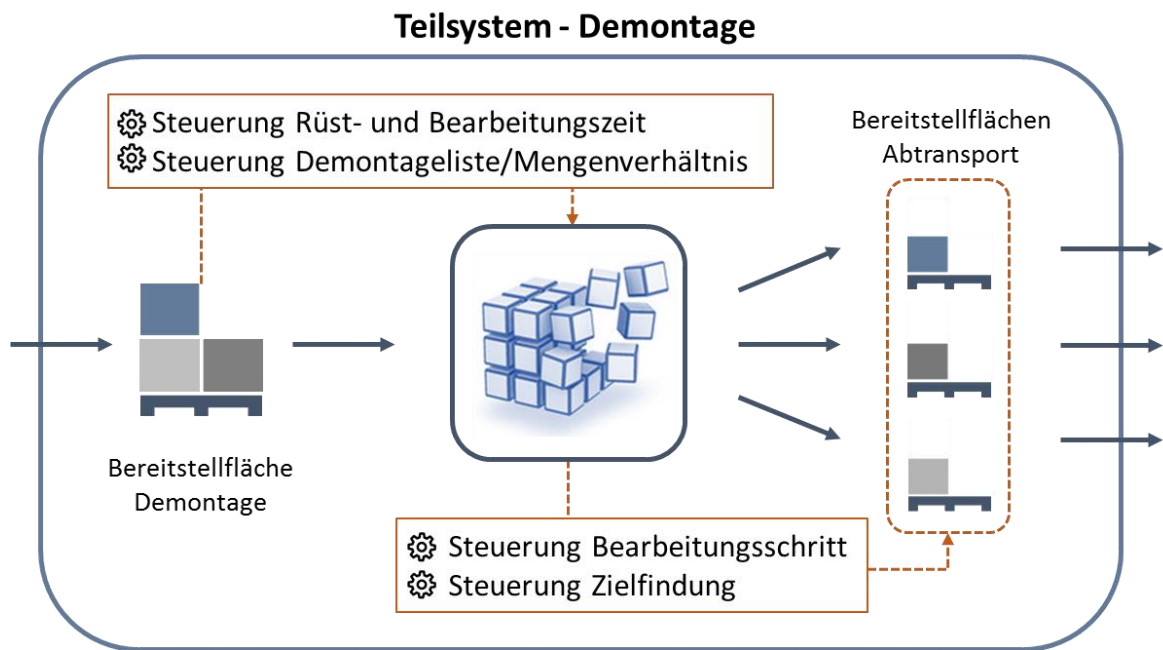


**Abbildung 39: Formales Modell eines Bearbeitungssystems**

Im Bearbeitungssystem sind insgesamt zwei Bereitstellflächen angelegt, die sich vor und nach der Bearbeitungsstation befinden. Diese dienen als Wartebereiche für noch zu bearbeitende oder abzutransportierende Erzeugnisse. Bei dem Übergang eines Erzeugnisses von der Bereitstellfläche zur Bearbeitung werden durch eine Steuerung die erforderlichen Rüst- und Bearbeitungszeiten eingestellt.

Nach Abschluss des Bearbeitungsprozesses werden die Steuerungen Bearbeitungsschritt und Zielfindung vor dem Übergang auf die Abholfläche aufgerufen. Dabei wird auf die entsprechenden Attribute zugegriffen und die nächsten Bearbeitungssequenzen werden festgelegt. Anschließend wird das nächste Transportziel an das Transportsystem übermittelt.

Die Montage- und Bearbeitungsbereiche sind die Teilsysteme, die nur über einen Systemausgang verfügen. Bei den Demontagesystemen liegen jeweils nur ein Eingang und mindestens zwei Ausgänge vor. Es handelt sich folglich um eine 1 :  $n$  ( $n \geq 2$ ) Relation (siehe **Abbildung 40**).



**Abbildung 40: Formales Modell eines Demontagesystems**

Vor dem Umlagern der zu demontierenden Erzeugnisse auf die ausführende Station wird die Steuerung zum Einstellen der Rüst- und Bearbeitungszeit ausgeführt und die Demontageliste vorgegeben, in der alle Informationen zu den enthaltenen Einzelteilen und Mengenverhältnissen abgespeichert sind.

Die Steuerungen Bearbeitungsschritt und Zielfindung greifen, analog zu den Montage- und Bearbeitungssystemen, vor dem Umlagern auf die Bereitstellflächen zu. Sie regeln dabei für jedes einzelne Teil, wo und wie es weiterbearbeitet werden muss und vermittelt ebenfalls die Transportaufträge an das Transportsystem.

#### 4.5.2.2 Formalisierung des Transportsystems

Das Transportsystem erfüllt eine Verbindungsfunktion zwischen allen Teilsystemen zur Bearbeitung und dem Gesamtsystem. Insbesondere die Abbildung der Wegestruktur des Layouts und die Erfassung von Statistikwerten zur Auswertung von Transportdistanzen wird durch das Transportsystem ermöglicht. **Abbildung 41** stellt den formalen Aufbau bzw. die Eingliederung des Transportsystems in das Gesamtsystem beispielhaft dar.

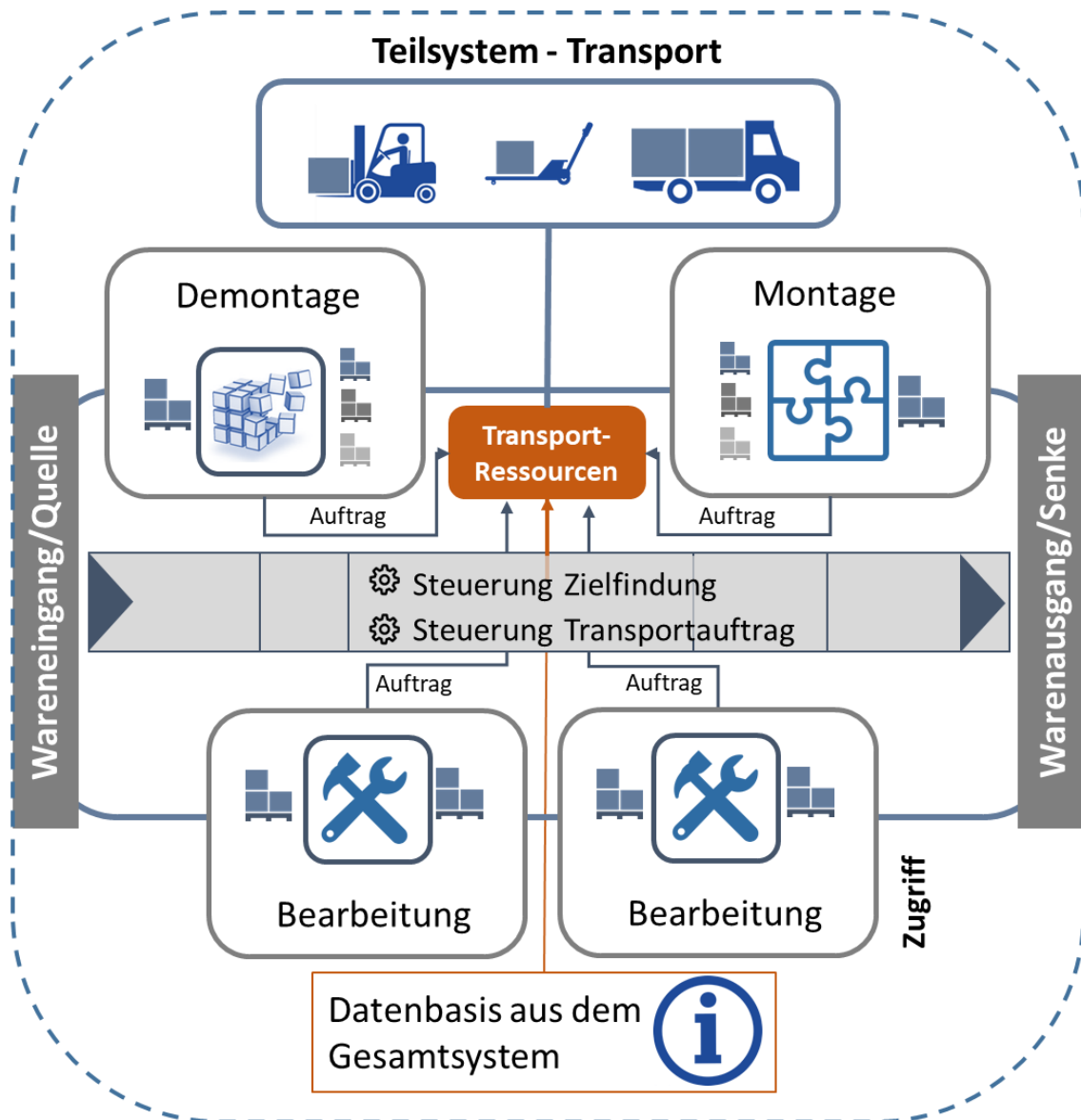


Abbildung 41: Formales Modell des Transportsystems

Neben der Erfassung von Transportdistanzen soll auch die Vermittlung von Transportaufträgen an unterschiedliche Transportressourcen, wie z.B. Gabelstapler oder Schlepper, ermöglicht werden. Damit die Steuerungen alle Vorgänge gemäß den Vorgaben ausführen, ist der Zugriff auf die Datenbasis aus dem Gesamtsystem erforderlich.

Basierend auf den Dimensionen des Layouts wird der Transportweg erstellt. Eine Segmentierung des Weges ergibt sich aus den Distanzen zwischen allen Teilsystemen, die Maschinen, Anlagen und Bereiche mit ihren unterschiedlichen Funktionen darstellen. Innerhalb dieser Teilsysteme wird die Steuerung Zielfindung nach Abschluss der Bearbeitung aufgerufen und weist dem Transportgut das nächste anzusteuern Ziel in Form eines Attributs zu. Diese



Steuerung ist auch im Transportsystem hinterlegt und generiert gemeinsam mit der Steuerung der Transportaufträge einen Transportbefehl für eine jeweilige Transportressource. Stehen mehrere gültige Ziele zur Verfügung, wird durch eine Steuerung, die eine Auswahl unterschiedlicher Verteilstrategien zulässt, ein konkretes Ziel ausgewählt. Folgende **Verteilstrategien** werden berücksichtigt:

- **gleichmäßige Verteilung:** Die zu transportierenden Erzeugnisse werden gleichmäßig auf alle zulässigen Ziele umgelagert. Diese Verteilstrategie berücksichtigt eine wichtige Grundannahme bei der Erstellung der Transportmatrix. In dieser vergleichsweise frühen Phase der Planung wird diese Annahme getroffen, wenn noch keine weiteren Aussagen zu den einzelnen Auslastungen und der daraus resultierenden Aufteilung der Transporte getroffen werden können.
- **kürzeste Wartezeit:** Es werden die eingeplanten Aufträge der zulässigen Zielsysteme überprüft und auf das Teilsystem umgelagert, in dem die Zeit bis zur Bearbeitung am kürzesten ist. Mit dieser Verteilstrategie kann eine realistische Aufteilung der Transporte zu den einzelnen Maschinen ermittelt werden, da die Bearbeitungszeiten berücksichtigt und die betriebliche Praxis besser abbildet wird.

Die Auswahl der Transportressource erfolgt anhand der im Gesamtsystem hinterlegten Informationen. Transportaufträge werden immer an die nächste freie Ressource vermittelt, die den Anforderungen entspricht.

#### **4.5.2.3 Formalisierung des Basismodells zur automatisierten Generierung layoutspezifischer Simulationsmodelle**

Ein wesentliches Ziel bei der Umsetzung stellt der automatisierte Modellaufbau auf Basis von Layoutdaten dar. Dieser Aspekt nimmt daher grundlegenden Einfluss auf das formale Modell. Insbesondere die dafür erforderlichen Daten müssen für die automatisierte Modellgenerierung immer nach der gleichen Systematik erfasst werden. Die zuvor beschriebenen Teilsysteme zur Modellierung des Transportes und den unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen bilden modulare Bausteine zur Erzeugung des Simulationsbasismodells.

Da der Modellierungsansatz universell für die Erstellung von Produktionslayouts mit einfachen Wegestrukturen gelten soll, ist es sinnvoll den Modellaufbau in zwei Schritte zu unterteilen. Um die Erzeugung der Simulationsmodelle möglichst flexibel und universell zu gestalten, werden alle erforderlichen Simulationsbausteine, Steuerungen und die Statistikerfassung in einem Basismodell entwickelt. Anschließend wird aus dem Basismodell das von dem

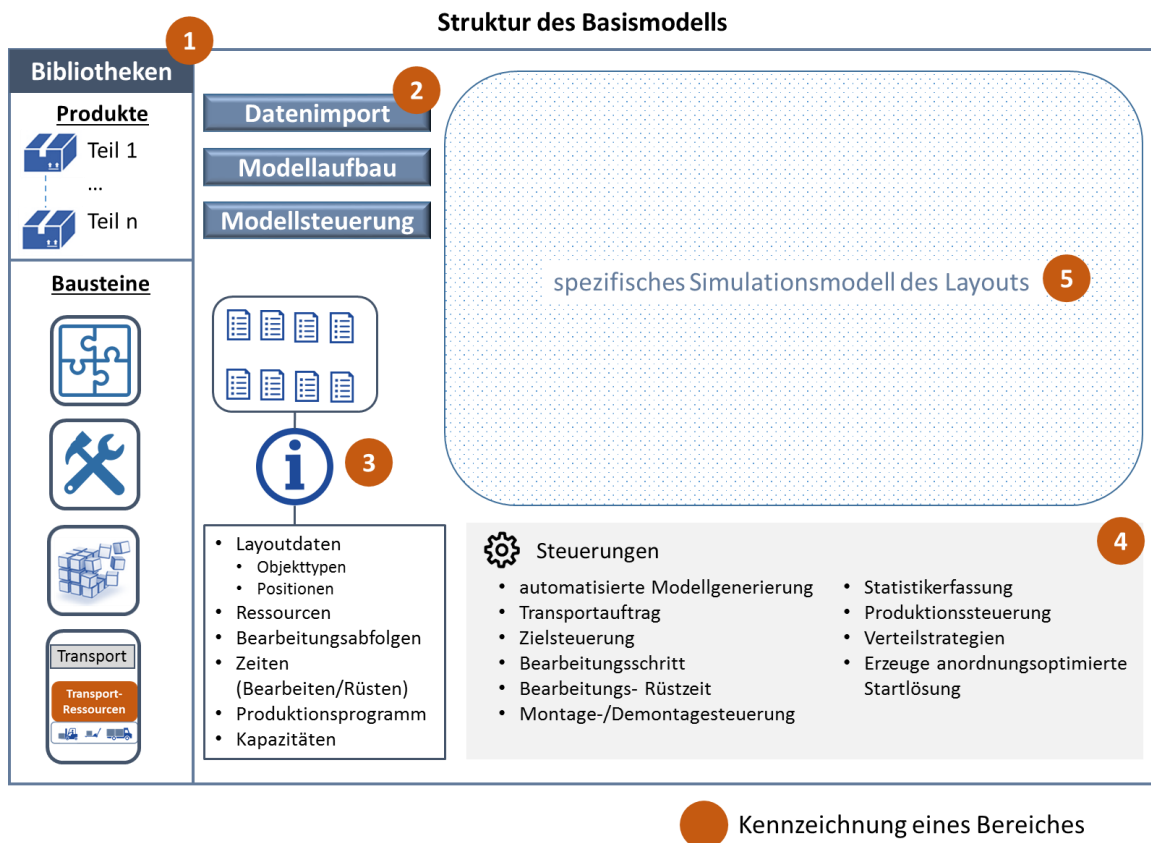
Layout abhängige und somit spezifische Simulationsmodell automatisiert generiert. Der Aufbau des Basismodells und des (layout-) spezifischen Simulationsmodells werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

### Aufbau des Basismodells

Alle Steuerungen, Teilsysteme und Bausteine zur Erzeugung eines (Layout-) spezifischen Simulationsmodells werden in dem Basismodell hinterlegt. Durch den Import von Layout- und Produktionsdaten kann automatisiert ein spezifisches und lauffähiges Modell generiert werden. Das Basismodell muss dabei folgende Anforderungen und Aufgaben erfüllen:

- **Einfache Bedienbarkeit:** Vereinfachung der Steuerung des Aufbaus und der Simulation sowie Steigerung der Nutzerfreundlichkeit, auch für unerfahrene Anwender.
- **Transparenter und strukturierter Aufbau:** Steigerung der Übersichtlichkeit, der Nachvollziehbarkeit und des Wiedererkennungswertes (insbesondere bei der automatisierten Abbildung von Layouts).
- **Bereitstellung der Teilsysteme:** Integration der Teilsysteme in Form von Bausteinen für den modularen Aufbau des Gesamtmodells in einer Bibliothek.
- **Verwaltung der Steuerungen:** Zentrale Ablage der Steuerungen sowie Auswahl und Einbindung der erforderlichen Steuerungen in die Teilsysteme gemäß ihren Aufgaben bei dem automatisierten Modellaufbau.
- **Verwaltung der Informationen und Daten:** Zentrale Ablage der Informationen nach einer durch die Steuerungen verwertbaren Systematik. Auf die Informationen und Daten wird bei der Modellgenerierung und der Steuerung der Prozesse während der Simulation zugegriffen.

Aus diesen Anforderungen wurde das in der nachfolgenden **Abbildung 42** dargestellte Konzept eines bedienerfreundlichen Oberflächenaufbaus des Basismodells entwickelt.



**Abbildung 42: Strukturierungskonzept der Oberfläche des Basismodells**

Die Oberfläche des Basismodells ist in fünf Bereiche unterteilt. Auf der linken Seite finden sich die Bibliotheken, in denen sich die Simulationsbausteine (Teilsysteme) für die Montage, Demontage, Bearbeitungen und den Transport befinden. Die in der Simulation zu bearbeitenden Produkte oder Teile werden ebenfalls in den Bibliotheken abgelegt, damit das Produktionsprogramm, das während der Simulation durchlaufen wird, die Teile daraus mit den geforderten Mengen und Eigenschaften abrufen kann.

Der zweite Bereich umfasst drei Schaltflächen, die vom Anwender für die Erstellung eines Simulationsmodells und die Durchführung von Simulationsexperimenten zu bedienen sind. Jede Schaltfläche öffnet einen Dialog, durch den der Nutzer über vorgegebene Auswahlmöglichkeiten und Datenabfragen das aufzubauende Modell und die Simulationsexperimente konfigurieren kann. Auf diese Weise werden zunächst über den Dialog „Datenimport“ die im dritten Bereich dargestellten Informationen in das Basismodell geladen. Die Daten werden in vorformatierten Tabellen abgespeichert, die die Steuerungen auslesen und verarbeiten können. Die Formatierung beinhaltet auch die Vorgabe von Datentypen innerhalb einzelner Spalten, mit dem Ziel, inkompatible Anfragen

seitens der Steuerungen zu vermeiden. In **Abbildung 43** sind beispielhaft zwei vorformatierte Tabellen dargestellt.

#### Layoutdaten

Bezeichnung/Name	Pos. Eingang [m]	Pos. Ausgang [m]	Breite [m]	Reihenzuweisung
Wareneingang	0	0	4	-
Drehbank	1,8	1,8	2	1
Bohrmaschine_1	2	2	0,8	2
Bohrmaschine_2	3	3	0,8	2
CNC-Fräse	5	5	3	1
Sandstrahlkabine	4,5	4,5	1,2	2
...	...	...	...	...

#### Bearbeitungsreihenfolge

Fertigungsschritt	Teil 1	Teil 2	Teil n
1	Drehbank	Bohrmaschine_1	...
2	CNC-Fräse	Drehbank	...
3	Warenausgang	Sandstrahlkabine	...
4		Warenausgang	...
...			...

**Abbildung 43: Vorformatierte Beispieltabellen für Import und Steuerungen**

In den vorgegebenen Tabellenblättern werden die Datentypen gemäß der zu verarbeitenden Informationen festgelegt. Aus der Tabelle „Layoutdaten“ werden die in der ersten Spalte angegebenen Maschinen als Bausteine in das Simulationsmodell übertragen, benannt und auf den in Spalte zwei und drei angegebenen Positionen eingefügt. Bearbeitungsreihenfolgen werden ebenfalls in tabellarischer Form abgelegt, auf die während der Simulation zugegriffen wird.

Über den zweiten Dialog „Modellaufbau“ werden zusätzliche Informationen abgefragt. Diese Abfragen beinhalten u.a., ob eine anordnungsoptimierte Startlösung zu erzeugen ist oder bei Verwendung von Montagestationen welches Teil, als Hauptteil bzw. neues Teil weiter transportiert werden soll, damit die Erfassung der Statistiken korrekt durchgeführt wird. Nach Beenden dieses Dialoges erfolgt die automatisierte Modellgenerierung. Der Dialog „Modellsteuerung“ erlaubt die Auswahl von Produktions- und Verteilstrategien, die bei einem Simulationslauf berücksichtigt werden sollen.

Der vierte Bereich umfasst alle in der Simulation und bei der Modellgenerierung erforderlichen Steuerungen. Während der Modellgenerierung werden auf Basis der importierten Informationen zum Layout und den enthaltenen Objekten (Typ,

Anzahl, Kernaufgabe) die entsprechenden Bausteine in das Modell geladen und mit den Steuerungen zur Regelung der Bearbeitungsschritte, Zielfindung, Transportauftragsvermittlung und Statistikerfassung verknüpft.

Die Wegestruktur und -segmentierung des Transportsystems wird gemäß der importierten Layoutdaten erzeugt und verbindet die entsprechenden Bausteine mit den Wegabschnitten. Die geplanten Erweiterungen des DRFLP sehen vor, zukünftig auch unterschiedliche Positionen für die Bereitstellflächen oder Bedienpunkte der anzuordnenden Objekte zu berücksichtigen, d.h. zwischen den Punkten für die Übergänge (Ein- und Ausgang) in einen Baustein muss ein weiteres Wegsegment in der vorgesehenen Distanz eingefügt werden. Dies ist bei der Implementierung zusätzlich vorzusehen.

Im fünften Bereich des Basismodells (**Abbildung 42**) wird das automatisiert generierte Layout mit allen dafür benötigten Teilsystemen maßstabsgerecht auf Grundlage der importierten Koordinaten angezeigt. Damit ist die Erstellung des spezifischen Simulationsmodells abgeschlossen und Simulationsläufe können gestartet werden.

### **Automatisierter Aufbau des spezifischen Simulationsmodells**

Bei der automatisierten Erstellung des spezifischen Simulationsmodells müssen die importierten Daten durch Steuerungen schrittweise in ein Modell umgesetzt werden. Nachfolgend werden die Schritte sowie die erforderlichen Daten und Steuerungen zusammengefasst:

#### **Schritt 1 – Übertragen der Bausteine und Positionen**

Zu Beginn des automatisierten Modellaufbaus werden die im Basismodell hinterlegten Layoutdaten betrachtet. Diese enthalten Informationen über Anzahl, Typ und Position der abzubildenden Objekte. Aufgrund dieser Daten werden die erforderlichen Bausteine aus der Bibliothek maßstabsgerecht anhand der vorgegebenen Positionen in das Basismodell eingefügt. Die Erzeugung des Transportsystems erfolgt ebenfalls in diesem Schritt. Dabei werden alle Maschinenabstände als ein Segment des Gesamtweges berücksichtigt und mit den Bausteinen verbunden.

#### **Schritt 2 – Verknüpfen der Steuerungen**

Die eingefügten Bausteine werden mit den Steuerungen aus dem Basismodell verknüpft, um alle Produktionsabläufe abbilden zu können. Dazu zählen z.B. die Steuerung der Zielfindung, der Bearbeitungsschritte, der Transportaufträge, der Rüst- und Bearbeitungszeiten. Liegen in dem Layout mehrere Maschinen gleichen

Typs vor, wird zusätzlich die Steuerung der Verteilstrategien eingebunden, um die Auswahl eines Nachfolgers entsprechend der ausgewählten Strategie im Basismodell durchzuführen. Die Parametrisierung wird dynamisch während des Simulationsablaufes durch die Steuerungen geregelt. Daher wird für die Einstellung der Parameter kein separater Schritt im Modellaufbau vorgesehen.

### **Schritt 3 – Anlegen der Ressourcen**

Im dritten Schritt erfolgt die Erzeugung aller weiteren für die Simulation benötigten Ressourcen. Die während eines Simulationslaufes zu bearbeitenden Teile werden in der Bibliothek angelegt und durch die hinterlegten Produktionsprogramme abgerufen. Weiterhin sind in diesem Schritt die Transportressourcen anzulegen, auf die das Transportsystem die Transportaufträge verteilt.

Nach Durchlauf dieser drei Schritte ist das spezifische Simulationsmodell vollständig aufgebaut und lauffähig. In Verbindung mit den im Dialog „Modellsteuerung“ ausgewählten Einstellungen können gezielt Simulationsexperimente durchgeführt werden. Bei Abschluss eines Simulationslaufes sollen die erfassten Statistikwerte in einem Ergebnisbericht oder einer exportfähigen Tabelle angezeigt werden.

#### **4.5.3 Implementierung in Plant Simulation**

Die grundlegenden Funktionen, Zusammenhänge und Systemeigenschaften sind bereits im formalen Modell beschrieben und bilden die Basis für die Implementierung. Es sind dabei die gängigen Grundsätze und Hinweise bei der Modellimplementierung zu beachten. Klassische Prinzipien zielen nach (Robinson 2004, S. 128) und (Wenzel et al. 2008, S. 137) auf folgende Aspekte ab:

- möglichst geringer Implementierungsaufwand - *Speed of Coding*
- möglichst einfach verständliches Modell - *Transparency*
- möglichst leichte Veränderung und Anpassung des Modells - *Flexibility*
- möglichst geringe Zeit für die Ausführung - *Run-Speed*

(Wenzel et al. 2008, S. 137; Robinson 2004, S. 128)

Neben diesen vier Grundsätzen ist auch die „Trennung von Daten und Modell“ zu berücksichtigen, d.h. die Daten sollten nicht direkt mit funktionalen Beschreibungen verbunden, sondern beispielsweise über Variablen entkoppelt werden, die in einen vorgegebenen Datenbereich abgelegt und zugewiesen werden (Wenzel et al. 2008, S. 136).

Bei der Modellierung von komplexen Materialflusssystemen ist zudem auf eine „Trennung von physikalischem Modell und Steuerungsregeln“ zu achten. Die direkte Verknüpfung von Steuerungen mit den Bausteinen kann vor allem bei umfangreichen Modellen zu einem sehr hohen Anpassungsaufwand führen, wenn z.B. die übergeordnete Steuerung der Abläufe bearbeitet wird.

Eine Trennung der spezifisch zu implementierenden Steuerungen von den Bausteinen wirkt sich positiv auf die Qualität des Modells aus (Wenzel et al. 2008, S. 137). Dies kann durch das Hinterlegen einer simplen Steuerregel im Modellbaustein erreicht werden, die über eine Schnittstelle die Daten und Anweisungen aus einer übergeordneten Steuerung erhält (Wenzel et al. 2008, S. 137).

Die genannten Grundsätze wurden bei der Implementierung berücksichtigt. In diesem Teil der Arbeit wird auf eine detaillierte Beschreibung der programmiertechnischen Umsetzungen sowie die Darstellung und Erläuterung von Quellcodes verzichtet.

Vorrangig soll die Vorgehensweise zur automatisierten Modellerstellung in Verbindung mit den Ergebnissen der Anordnungsoptimierung aufgezeigt werden, da sie eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung der Gesamtmethodik darstellt.

Die Trennung der Steuerungsregeln vom physikalischen Modell sowie die Trennung von Daten und Modell werden in dem implementierten Ablauf der automatisierten Modellgenerierung besonders berücksichtigt. In der folgenden **Abbildung 44** soll das Zusammenwirken der zuvor entwickelten Bausteine und Steuerungen mit den festgelegten Basisdaten verdeutlicht werden.

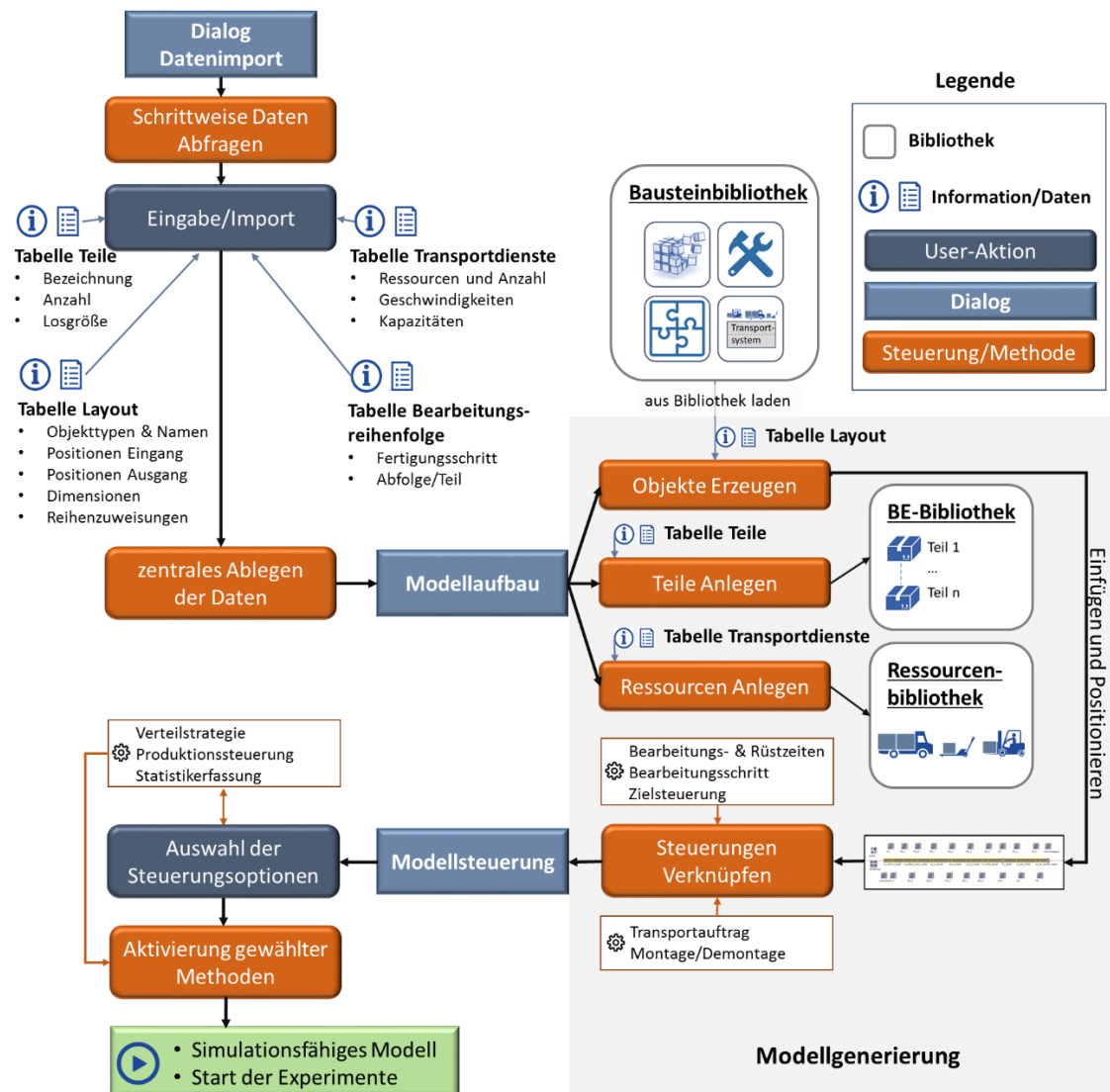


Abbildung 44: Ablauf der entwickelten und implementierten Modellgenerierung

Der erste Schritt der Modellgenerierung wird mit dem Dialog *Datenimport* gestartet. Durch den Anwender müssen die Tabellen *Teile*, *Layout*, *Bearbeitungsreihenfolge* und *Transportdienste* ausgefüllt bzw. die zu importierenden Dateien ausgewählt werden (siehe **Abbildung 45**).



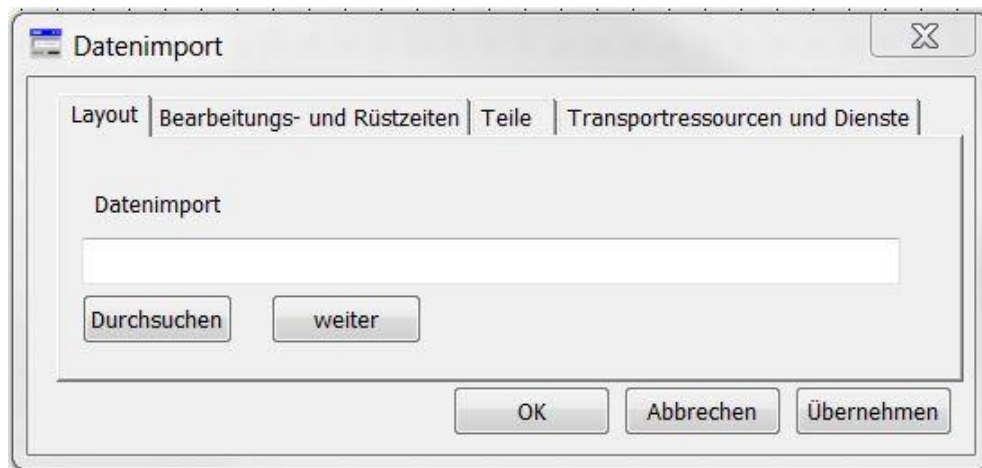


Abbildung 45: Aufbau des Dialogfensters zum Datenimport

Um Fehler bei der Dateneingabe auszuschließen, werden durch den Dialog schrittweise die entsprechenden Informationen abgefragt. Dadurch lässt sich vermeiden, dass der Anwender von Informationen „überhäuft“ wird. Nach dem vollständigen Durchlaufen der Abfragen erfolgt die zentrale Ablage der Daten durch eine „Methode“.

Im zweiten Schritt wird durch den Dialog *Modellaufbau* geprüft, ob alle erforderlichen Informationen vorliegen. Wenn die Überprüfung ergibt, dass für die Modellgenerierung erforderliche Daten fehlen, erfolgt eine Fehlermeldung, andernfalls wird der automatisierte Modellaufbau gestartet und durch drei „Methoden“ die Basis für das simulationsfähige Modell geschaffen. **Abbildung 46** zeigt das Dialogfenster für den Modellaufbau.

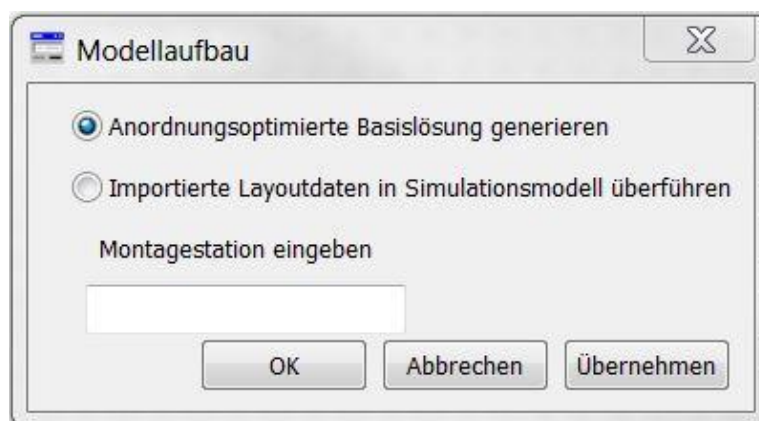


Abbildung 46: Aufbau des Dialogfenster zur Modellgenerierung

Die erste Methode lädt dementsprechend die zuvor entwickelten Bausteine zur Abbildung von Bearbeitungs-, Montage- und Demontagesystemen aus der Bausteinbibliothek gemäß ihrer Layoutpositionen und berechnet die Wege für das anschließend eingefügte Transportsystem.

Durch die zweite und dritte Methode werden die zu produzierenden Teile und die zur Verfügung stehenden Transportressourcen in der BE<sup>28</sup>- und der Ressourcen-Bibliothek angelegt. Während der Simulation werden die hinterlegten Teile gemäß dem Produktionsprogramm im System bearbeitet und die Ressourcen durch die Steuerung *Transportauftrag* abgerufen.

Es befinden sich nun alle Bausteine im Simulationsmodell, sodass die Generierungsmethode *Steuerungen verknüpfen* alle erforderlichen Steuerungen, die als Methoden im Basismodell gespeichert sind, in den Bausteinen hinterlegt. Folgende Methoden sind dabei zu integrieren:

- *Bearbeitungs- und Rüstzeiten* – Verknüpfung mit den Bereitstellflächen am Eingang der Bausteine für Bearbeitung, Demontage, Montage (Einstellen der Zeiten bevor das Teil in die Bearbeitungsstation eintritt).
- *Bearbeitungsschritt und Zielsteuerung* – Verknüpfung mit den Bereitstellflächen am Ausgang eines Bausteins (Kontrolle des nächsten Bearbeitungsschrittes, um das nächste Ziel festzulegen).
- *Transportauftrag* – Die Steuerung der Transportaufträge erfolgt über den Broker<sup>29</sup>, der in Plant Simulation einen Standardbaustein zur Vermittlung von Diensten darstellt. Die Methode *Transportauftrag* stellt eine Importeranfrage an den Broker, der durch eine Exporteranfrage den Transportauftrag an die erforderliche Transportressource vermittelt.
- *Montage/Demontage* – Diese Methode verknüpft Montage- und Demontagelisten mit den entsprechenden Stationen in den zuvor in das Modell geladenen Bausteinen.

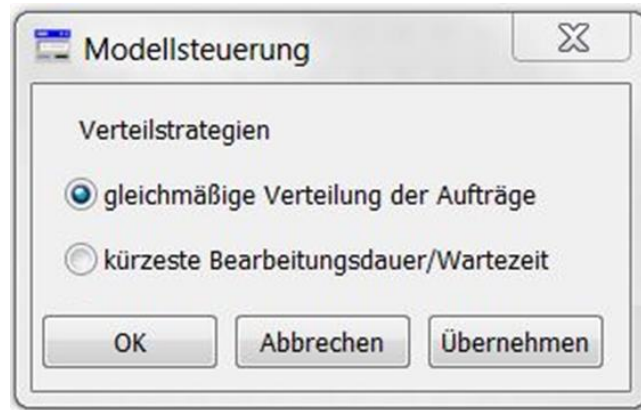
Durch Verknüpfen der Methoden in den Bausteinen wird die Modellgenerierung abgeschlossen. Dem Anwender ist es nun möglich über den Dialog Modellsteuerung weitere Eingaben vorzunehmen, mit denen das Modellverhalten über unterschiedliche Steuerungsmöglichkeiten beeinflusst werden kann. Dabei

---

<sup>28</sup> BE ist die Abkürzung von bewegliche Elemente. Diese stellen in Plant Simulation die zu transportierenden Teile dar.

<sup>29</sup> Der Broker Vermittelt Importer- und Exporteranfragen. Dabei werden z.B. Transporte von einzelnen Stationen angefragt und über den Broker der geforderte Transportdienst zugewiesen.

stehen mehrere Auswahlmöglichkeiten zu Verteilstrategien und Prinzipien der Produktionssteuerung zur Verfügung. Das Dialogfenster ist in der nachfolgenden **Abbildung 47** dargestellt.



**Abbildung 47:** Aufbau des Dialogfensters zur Modellsteuerung

Die Verteilstrategien werden verwendet, wenn ein Teil zur weiteren Bearbeitung transportiert werden soll und mehrere mögliche Ziele vorliegen. Folgende Verteilstrategien sind im Modell implementiert:

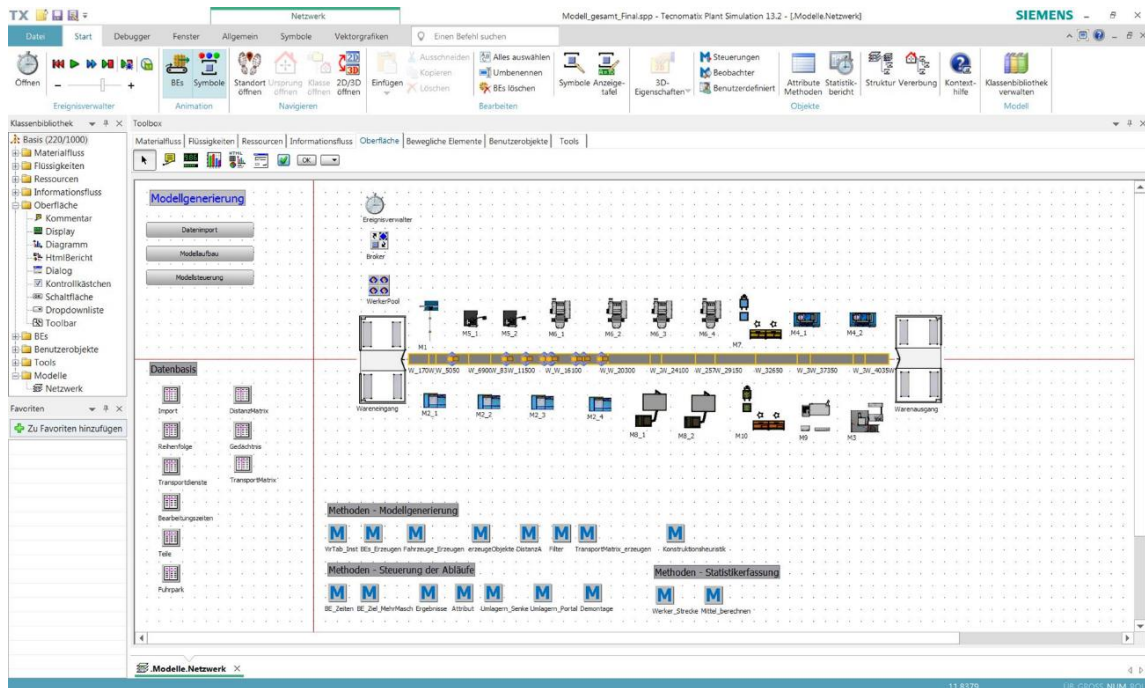
- **kürzeste Bearbeitungs-/Wartezeit:** Es wird das Ziel ausgewählt, bei dem die Wartezeit und die Bearbeitungszeit am kürzesten sind, um die Durchlaufzeiten zu reduzieren.
- **gleichmäßige Verteilung:** Es wird im gleichen Verhältnis auf die Nachfolger umgelagert, damit alle Ressourcen genutzt werden.

Bei Beendigung des Dialoges wird die eingegebene Konfiguration durch eine Methode abgefragt. Diese übergeordnete Methode ist wiederum zuständig für die Aktivierung der Methoden, welche die selektierten Produktions- und Verteilstrategien repräsentieren.

Nach Durchlaufen der drei Dialoge ist das Simulationsmodell in der gewünschten Konfiguration nun vollständig lauffähig. Eine Änderung der Steuerungsoptionen ist jederzeit über den Dialog „Modellsteuerung“ (siehe Abbildung 47) möglich. Durch Simulationsexperimente mit den unterschiedlichen Konfigurationen können die Auswirkungen der Verteilstrategien untersucht und gegenübergestellt werden.

Die Implementierung des Basismodells beinhaltet die Entwicklung aller zuvor beschriebenen Steuerungs- und Erzeugungsmethoden, die Umsetzung der notwendigen Teilsysteme als Simulationsbausteine sowie die Erstellung der Dialoge und Bedienoberflächen. Bei der Programmierung der Methoden wird

insbesondere die Anpassungsfähigkeit und die Erweiterbarkeit berücksichtigt, um eine weitere Spezifizierung für die Simulation während des Betriebes zu ermöglichen. Nach dem Import der Daten in das Basismodell wird das layoutspezifische Simulationsmodell generiert. **Abbildung 48** zeigt das implementierte und automatisch erzeugte Modell in der 2D-Darstellung von Plant Simulation.



**Abbildung 48: Implementiertes Simulationsmodell nach dem automatisierten Modellaufbau**

Das dargestellte spezifische Simulationsmodell basiert auf einer exakt gelösten DRFLP-Anordnung. Gemäß den importierten Daten wird das Layout der Maschinen und der Wegestruktur maßstabsgerecht in Plant Simulation abgebildet. Zusätzlich lässt sich der Wiedererkennungswert durch die Verwendung von Abbildungen der Maschinen, welche die Standardgrafiken der Bausteine (siehe Abbildung 36) ersetzen, deutlich steigern.

Parallel zur Implementierung im 2D-Modell erfolgt auch die Umsetzung in einem 3D-Modell, welches dem Anwender noch schneller eine Übersicht und eine bessere Nachvollziehbarkeit ermöglicht. Auf die 3D-Simulationsmodelle wird insbesondere bei der Erweiterung für die partizipative Planung näher eingegangen.

#### 4.5.4 Verifikation und Validierung

Die Verifikation und Validierung (V&V) von Daten und Modellen kann durch zahlreiche verschiedene Techniken erfolgen, die in den einzelnen Phasen der Modellierung eingesetzt werden. Unter Verifikation wird die Überprüfung verstanden, ob ein Modell korrekt, z.B. in einer Simulationssoftware, umgesetzt wurde. Bei der Validierung wird hingegen kontrolliert, ob das Modell das reale System mit der erforderlichen Genauigkeit nachbildet.

Nach dem in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien werden die Verifizierungs- und Validierungstechniken in jeder Phase angewendet. An dieser Stelle werden die verwendeten Techniken aufgelistet und in der nachfolgenden Tabelle den Phasen sowie den erstellten Modellen zugeordnet.

**Tabelle 5: Eingesetzte Verifizierungs- und Validierungstechniken**

Phase	Verifizierungs- / Validierungstechnik
<b>Aufgabendefinition</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schreibtischtest</li> <li>- Validierung im Dialog</li> </ul>
<b>Konzeptmodell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strukturiertes Durchgehen</li> <li>- Schreibtischtest</li> <li>- Validierung im Dialog</li> </ul>
<b>formales Modell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Test von Teilmodellen</li> <li>- Strukturiertes Durchgehen</li> <li>- Schreibtischtest</li> <li>- Validierung im Dialog</li> </ul>
<b>ausführbares (implementiertes) Modell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleich mit anderen Modellen</li> <li>- Animation</li> <li>- Sensitivitätsanalyse</li> <li>- Test von Teilmodellen</li> <li>- Strukturiertes Durchgehen</li> <li>- Schreibtischtest</li> <li>- Validierung im Dialog</li> </ul>

Nachfolgend werden die verwendeten Verifizierungs- und Validierungstechniken vorgestellt und die Durchführung anhand eines Beispiels aus der Implementierung zusammengefasst. Der Schreibtischtest umfasst die Kontrolle der selbst erarbeiteten Inhalte hinsichtlich der „Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit“ (Balci 1998, S. 356; Rabe et al. 2008, S. 102). Diese Selbstüberprüfung ist mit dem Risiko verbunden, dass eigene Fehler nicht erkannt werden und ist daher in Verbindung mit anderen Ansätzen wie der Validierung im

Dialog (Einbeziehen einer oder mehrerer Personen) einzusetzen (Rabe et al. 2008, S. 102). Diese beiden Techniken werden in allen Phasen eingesetzt.

Mit der zunehmenden Abarbeitung der Phasen zur Simulationsmodellerstellung steigt auch der Einsatz der Verifizierungs- und Validierungsansätze. Zur Absicherung des implementierten Modells kommen daher weitere Techniken zum Einsatz. Das strukturierte Durchgehen ist eine Methode, bei der die Beteiligten jeden Ausführungsschritt des Modells überprüfen und deren Richtigkeit sicherstellen, wobei hauptsächlich Personen eingesetzt werden sollten, die nicht maßgeblich an der Entwicklung beteiligt waren und dadurch eine unvoreingenommene Perspektive haben (Rabe et al. 2008, S. 105; Law 2007, S. 249). Ein Vorteil bei dieser Vorgehensweise ist neben der Validierung auch die unter den Betroffenen erzielte Glaubwürdigkeit (Rabe et al. 2008, S. 105).

Bei der Implementierung wird zudem die Animation zur Überprüfung des Systemverhaltens verwendet. Mit der Animation lässt sich jedoch nicht die Validität des gesamten Modells nachweisen. Vielmehr dient sie der transparenten Darstellung des Modellverhaltens und hilft, in bestimmten Zeiträumen Fehler festzustellen und zuzuordnen (Rabe et al. 2008, S. 96–97). Weiterhin wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, mit denen sich die Effekte auf die Ausgabewerte durch Variation der Eingabeparameter ermitteln und auf Plausibilität prüfen lassen.

Die Vorgehensweise zur Verifizierung und Validierung wird stellvertretend für das gesamte Modell anhand der Umsetzung der Zielsteuerungsfunktion beschrieben. An diesem Beispiel lässt sich der Ablauf anschaulich darstellen.

### **Verifikation und Validierung am Beispiel der Zielsteuerung**

Wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben, sind Steuerungen zur Regelung der korrekten Produktionsabläufe im Modell notwendig. Die Zielsteuerung ist erforderlich, um nach der abgeschlossenen Bearbeitung den Transport zu den nachfolgenden Bearbeitungsschritten bzw. den dafür benötigten Stationen zu veranlassen. Dafür müssen die zentral abgelegten Informationen abgerufen und verarbeitet werden.

Zur Initialisierung und beim Beenden von Bearbeitungsschritten ist es erforderlich, dass den zu transportierenden Objekten im Modell die Informationen zu den abzuarbeitenden Prozessschritten und den dafür zur Verfügung stehenden Bearbeitungs-, Montage- oder Demontagestationen angehängt werden. Bei mehreren möglichen Stationen (z.B. aufgrund mehrerer gleichartiger Maschinen)

muss entsprechend der Verteilstrategie das nächste Ziel ausgewählt werden. Der Pseudocode für die Zielsteuerung lautet folgendermaßen:

- Finde nächsten Bearbeitungsschritt
- Lege Ziel anhand des nächsten Bearbeitungsschrittes fest
- Überprüfe in der Tabelle mit allen mehrfach vorhandenen Stationen vollständig, ob das Ziel darin enthalten ist
  - Wenn Ziel enthalten, dann schreibe alle möglichen Ziele in eine neue Zeile der Tabelle „Ziele“
  - Überprüfe welche Verteilstrategie gewählt wurde, setze Ziel für den Transport gemäß der Auswahl fest
- Wenn nur ein Ziel enthalten, trage Ziel in die Tabelle Ziele ein und setze Ziel für den Transport fest

Dieser Pseudocode wurde zunächst im Schreibtischtest daraufhin überprüft, ob alle auftretenden Fälle abgedeckt und auf diese Weise korrekt bearbeitet werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Anweisungen keine Widersprüche aufweisen und eindeutig sind, damit bei der späteren Implementierung keine Fehler auftreten.

Im Dialog mit den Mitarbeitern des SWZ-Projektes *„Anforderungsrobuste Anordnung von Betriebseinheiten und Maschinen durch Kombination von Optimierung und Simulation“* wurden die Ergebnisse des Schreibtischtests bestätigt. Dieser erste validierte Zwischenstand bildet die Basis für die programmiertechnische Umsetzung (siehe **Abbildung 49**).



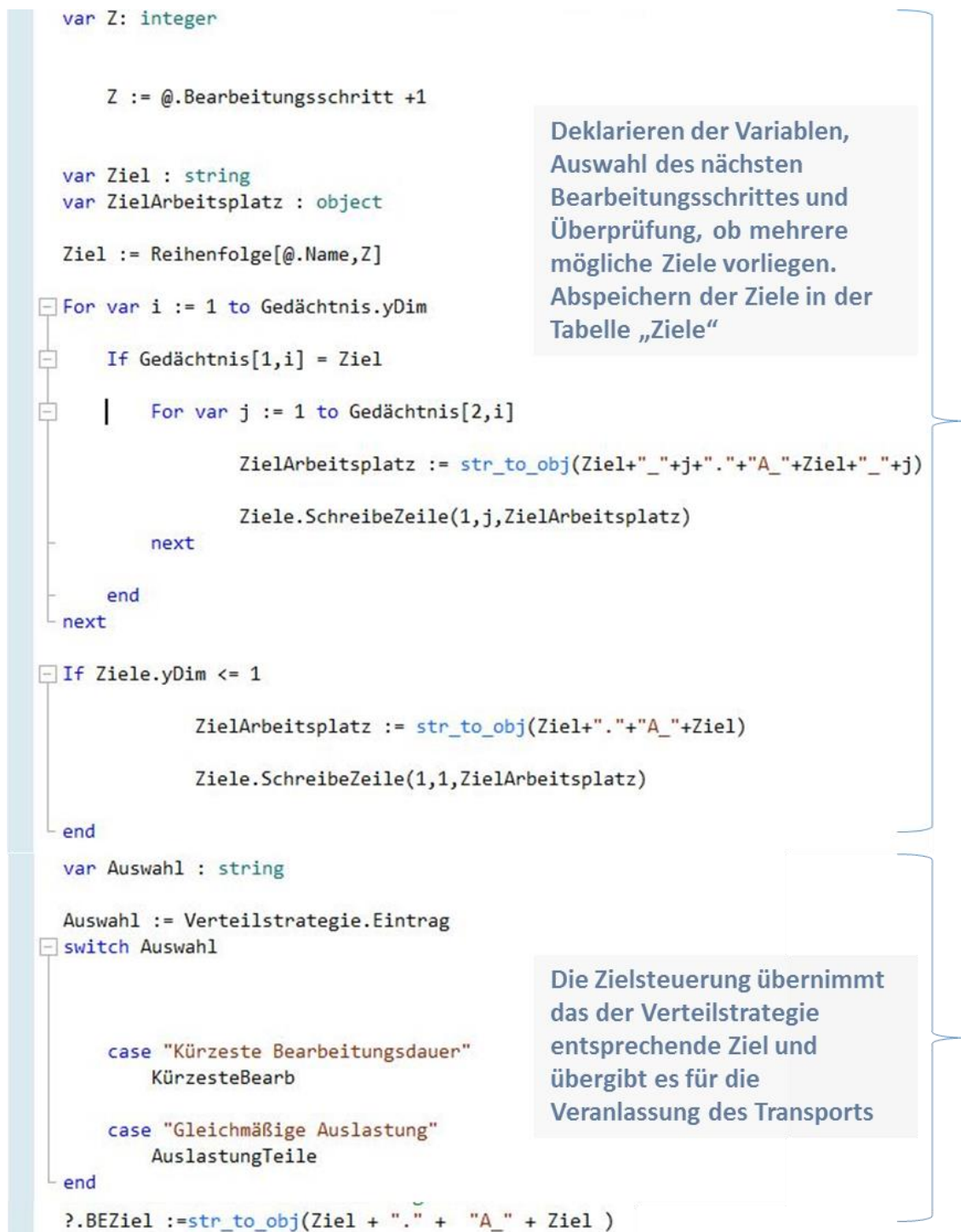


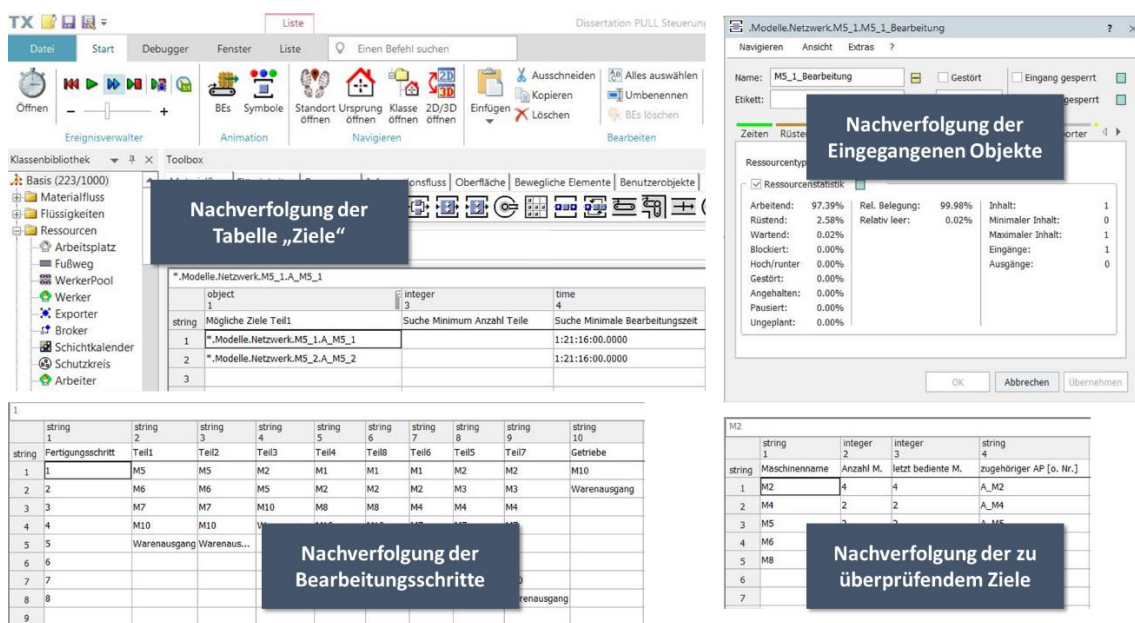
Abbildung 49: Beispiel des Programmcodes für die Verifizierung und Validierung

Während der Implementierung wurde zunächst der Schreibtischtest eingesetzt, um eine erste Überprüfung hinsichtlich der Vollständigkeit und der korrekten Funktionsweise vorzunehmen. Bei der Validierung im Dialog wurde gemeinsam mit einem weiteren Mitarbeiter des SWZ-Projektes die grundsätzliche



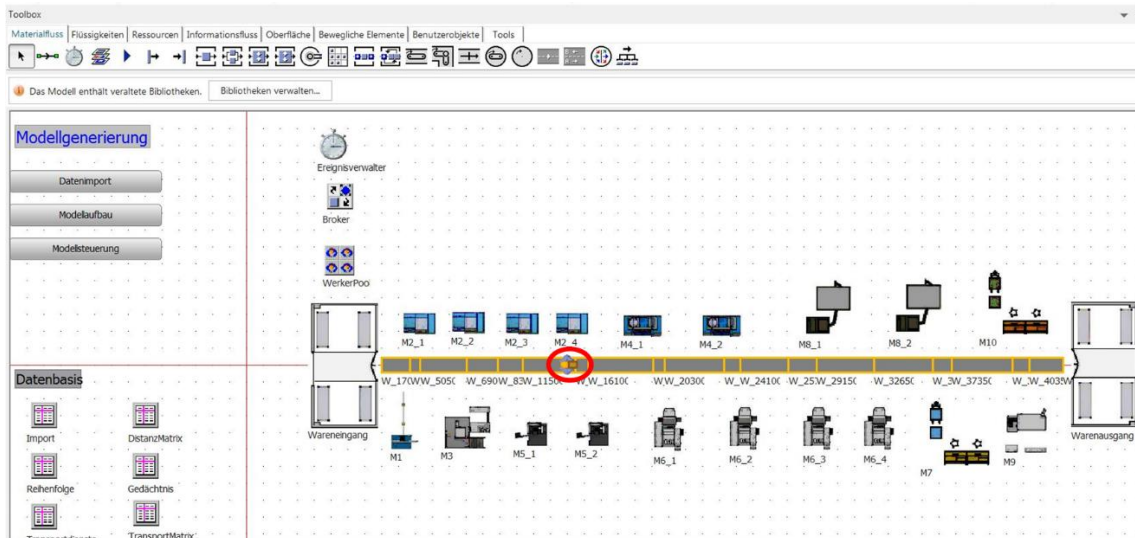
Funktionsweise nachgewiesen und über die Statistik der Stationen nachverfolgt, ob die passende Anzahl an Objekten an dieses Ziel transportiert wurde.

Anschließend wurde die V&V-Methode des strukturierten Durchgehens angewendet. Im Simulationsmodell und der zu überprüfenden „Methode“ können dazu Klassenhaltepunkte gesetzt werden. Sie ermöglichen, dass bei ihrem Aufruf während des Modellablaufes der Programmcode in der Anzeige erscheint und schrittweise ausgeführt werden kann. Dabei lassen sich alle durchzuführenden Programmbefehle einzeln nachverfolgen. **Abbildung 50** gibt einen Überblick über die bei der Verifikation und Validierung schrittweise nachverfolgten Tabellen und Statistiken.



**Abbildung 50: Schrittweise Nachverfolgung der Daten und des Programmcodes während der Verifikation und Validierung**

In den Tabellen werden direkt mit der Ausführung eines Programmschrittes die entsprechenden Daten angepasst. Auf diese Weise konnte eine korrekte Funktion der Steuerungen nachgewiesen werden. Ebenfalls wurden dafür die Statistiken der identifizierten Zielstation aufgerufen, die eine Auswertung der eingegangenen Objekte bzw. Transporte ermöglichen. Darüber hinaus konnte mit der Animation nachgewiesen werden, dass der richtige Transportdienst angefordert wurde (siehe **Abbildung 51**).



**Abbildung 51: Verifikation und Validierung mittels Animation am Beispiel der Zielsteuerung**

Die Animation ermöglicht eine visuelle Nachverfolgung der ablaufenden Vorgänge im Modell. Für die weitere Absicherung der korrekten Funktionsweise der Zielfindung kann sie über einen begrenzten Zeitraum eingesetzt werden. Die rote Markierung in der Abbildung hebt beispielsweise einen Werker hervor, der ein Teil an seinen Zielort trägt. Dabei erfolgte der Abgleich des Transportweges von der bereits vollständig durchlaufenen Station bis zum neu ermittelten Ziel. Der Modellablauf wurde bei den Transport- bzw. Umlagervorgängen auf die Zielstation angehalten und anschließend die Eingangsstatistiken überprüft. Währenddessen konnten auch die Transportdienste auf ihre Korrektheit geprüft werden.

Zusätzlich erfolgten weitere Tests von Teilmodellen bzw. den Teilsystemen (wie am Beispiel der Zielsteuerung), um zu kontrollieren, ob diese die realen oder geplanten Systemteile ausreichend genau abbilden. Diese Technik ist bei hierarchisch aufgebauten Gesamtsystemen sinnvoll anzuwenden. Das entwickelte Simulationsmodell besteht ebenfalls aus verschiedenen Teilsystemen (z.B. Bearbeitungs- und Transportsysteme), sodass sich diese Vorgehensweise auch in der vorliegenden Arbeit anwenden ließ.

Im Rahmen des SWZ geförderten Projektes „Anforderungsrobuste Anordnung von Betriebseinheiten und Maschinen durch Kombination von Optimierung und Simulation“ wurden bereits mehrere Simulationsmodelle zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem DRFLP manuell erstellt (Bracht et al. 2018a, S. 53; Fischer et al. 2017). Diese bilden eine sehr gute Basis zur Validierung des neu entwickelten Modells.

Anhand der bestehenden Modelle und Simulationsergebnisse wurde die Tauglichkeit des neu entwickelten Simulationsmodells in Verbindung mit der automatisierten Modellgenerierung nachgewiesen. Hierbei wurden bereits verifizierte und validierte Planungsdaten verwendet und die Modelle mit der gleichen Datenbasis ausgeführt. Die resultierenden Ergebnisse waren gleich, d.h. dass auch die Ausgabewerte des neu entwickelten Modells mit denen der bereits vollständig validierten Modelle übereinstimmen. Damit ist auch der Grundsatz der Vergleichbarkeit (siehe Kapitel 2.4.1), mit der Forderung, dass unterschiedliche Modelle zu gleichen Ergebnissen führen, erfüllt.

Die Verwendung des lauffähigen Simulationsmodells erfordert den Einsatz valider Daten. Im Simulationsmodell selbst ist nur eine Überprüfung der Kompatibilität der eingegebenen und durch die Methoden erwarteten Datentypen gewährleistet. Die grundsätzliche Tauglichkeit der Eingabedaten ist prinzipiell durch den Anwender unter Berücksichtigung von V&V-Methoden sicherzustellen, damit aussagekräftige Ergebnisdaten durch die Simulation ermittelt werden können.

#### **4.5.5 Einbindung von digitalen, partizipativen Werkzeugen**

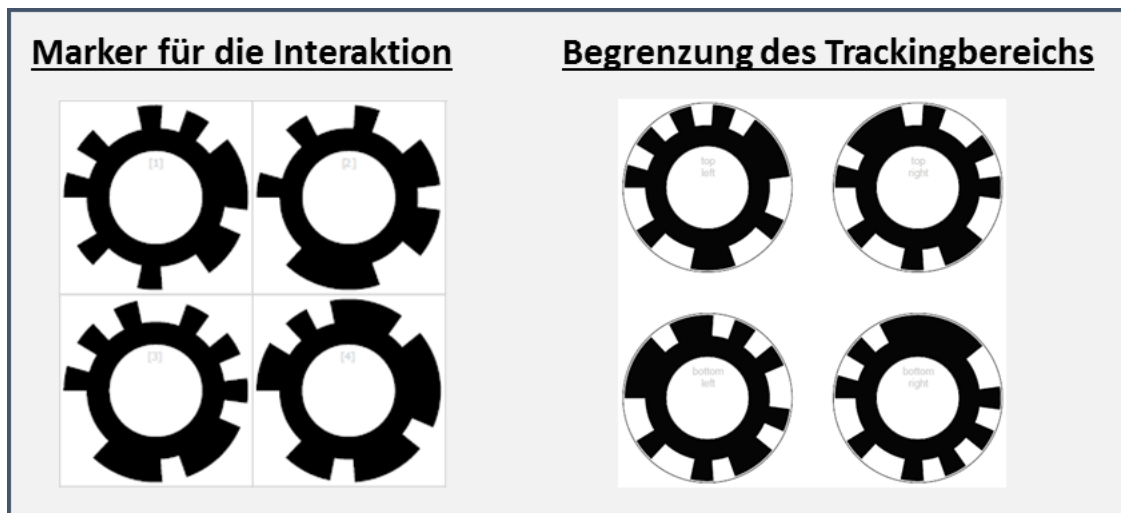
Die Simulation von anordnungsoptimierten Basislösungen wird durch den automatisierten Modellaufbau stark erleichtert und kann schnell durchgeführt werden. Ergebnisse der Anordnungsoptimierung stellen eine gute Ausgangsbasis für die weitere Layoutplanung dar, welche aber weiterentwickelt und den Planungsrestriktionen angepasst werden müssen. Um diese Anpassungen wiederum in der Simulation umzusetzen, bietet sich an, die Nutzung des Simulators für die Layoutgestaltung zu nutzen. Dabei sollen die Anwenderfreundlichkeit und die Reduktion des erforderlichen Expertenwissens weiterhin im Fokus stehen. Dies lässt sich beispielsweise durch die Verwendung von Planungstischen (siehe Kapitel 2.3.2) erreichen.

Einen weiterer Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit stellt daher die Möglichkeit zur Nutzung des implementierten Modells auf einem Planungstisch dar. Im Folgenden wird die Anpassung der entwickelten Ansätze für die partizipative Planung beschrieben und später an einem praktischen Anwendungsbeispiel bewertet. Die Partizipation wird hierbei vorrangig auf Planungsbeteiligte bezogen. Eine Einbindung von Mitarbeitern aus der Produktion kann zwar ebenfalls erfolgen, wird aber i.d.R. erst später im Planungsprozess angestrebt und ist daher nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Da möglichst keine bzw. wenige Umbrüche in der Softwarenutzung entstehen sollen, wird für die weitere Umsetzung ein Plug-in für Plant Simulation zum optischen Tracking von Positionsänderungen betrachtet. Diese Software-Erweiterung ermöglicht die Manipulation und somit interaktive Nutzung von 3D-Daten im Simulationsmodell und ist bereits fester Bestandteil von Plant Simulation.

Die Interaktion mit dem 3D-Simulationsmodell kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Das Plug-in unterstützt sowohl Eingaben über Touchdisplays als auch über ein kamerabasiertes Tracking von Markern. Zunächst wird die Verwendung der 3D-Simulation auf dem Planungstisch mit dem Trackingsystem beschrieben. Für die Realisierung sind neben dem Modell Marker zur Verknüpfung mit den zu platzierenden Objekten sowie eine Kamera für das Tracking erforderlich.

Das eddison Plug-in unterstützt die Erkennung von bis zu 84 Markern, die neben der Interaktion mit den 3D-Objekten, z.B. die Navigation durch mehrere Perspektiven ermöglichen und darüber hinaus für die Begrenzung des Planungsbereiches sowie die Kalibrierung erforderlich sind (eddison 2017). Die Art der verwendeten Marker sind beispielhaft in der nachfolgenden **Abbildung 52** dargestellt.



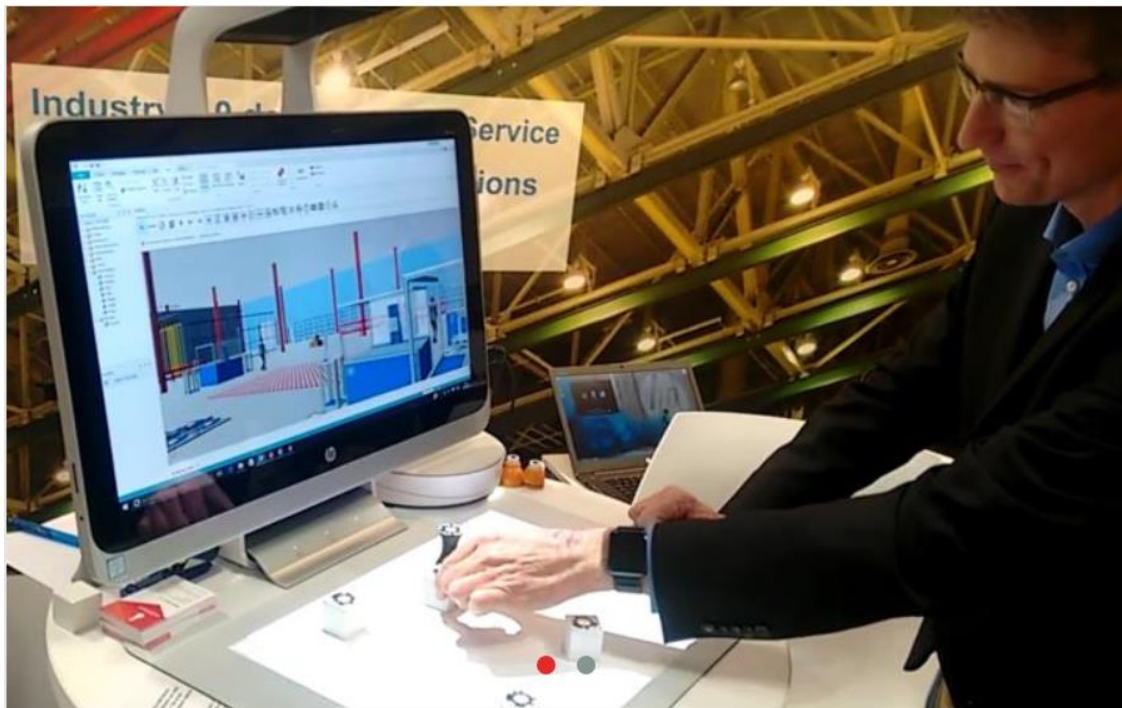
**Abbildung 52:** Marker zur Interaktion mit 3D-Objekten in Plant Simulation über das eddison Plug-in (eddison 2017)

Die Marker für die Interaktion müssen mit den zu bewegenden 3D-Grafiken im Simulationsmodell verlinkt und mit verschiedenen Eigenschaften belegt werden. An den Rändern des für die Planung zur Verfügung stehenden Bereiches werden die Begrenzungsmarker platziert. Diese bilden die Grenze des Arbeits- und

Trackingbereichs und dienen der Kalibrierung. Diese Marker sind daher zur Unterscheidung von den Interaktionsmarkern mit einem Rahmen gekennzeichnet. Ein Arbeitsbereich kann auf unterschiedliche Arten vorgegeben werden:

- Einfache Positionierung der vier Begrenzungsmarker
- Einbinden der Begrenzungsmarker auf einen gedruckten Grundriss
- Einbinden der Begrenzungsmarker in Grundrissprojektionen

Neben den Markern muss noch eine Kamera zur Erfassung der Positionen, Drehwinkel und Verschiebungen eingebunden werden. Eine Lösung, die sowohl die Projektion des Grundrisses, das Tracking und die Darstellung der 3D-Ansicht auf einem Monitor integriert, wird von dem Hersteller HP angeboten (siehe **Abbildung 53**).



**Abbildung 53: Partizipative Planung in Plant Simulation mit dem HP Sprout (edddison 2017)**

Bei dieser Variante ist allerdings die Interaktionsfläche und die Monitorgröße ein limitierender Faktor für die partizipative Planung mit mehreren Beteiligten und größeren Planungsumfängen. Aus diesem Grund ist eine Lösung anzustreben, die für die simulationsgestützte Layoutplanung mit einer gesteigerten Anzahl an Nutzern für umfangreichere Planungsaufgaben geeignet ist. Daher erfolgt eine prototypische Umsetzung durch Nutzung und Erweiterung der Hardware eines bestehenden Built-IT Planungstisches.

Die ursprüngliche Konfiguration Build-IT Planungstisch beinhaltet neben einem PC mit der entsprechenden Planungssoftware zwei Beamer sowie eine Infrarotkamera für die Erfassung der Maschinenpositionen und die Verschiebebewegungen. Die Beamer ermöglichen eine 3D-Wandprojektion und eine Abbildung der Draufsicht auf dem Tisch durch den Umlenkspiegel.

Um den Planungstisch im Rahmen der Gesamtmethodik zu nutzen, werden Anpassungen der Soft- und Hardware vorgenommen. Es wird durchgängig die Simulationssoftware Plant Simulation verwendet und durch das eddison Plug-in erweitert. Die Infrarotkamera wird durch eine hochauflösende Webcam ersetzt. Die vorhandene Top-Projektion wird beibehalten, um die Planungsgrundrisse auf dem Tisch darzustellen. Zudem werden die Maschinengrundrisse mit den Markern versehen und dienen als verschiebbare Elemente auf den Tisch.

Damit Plant Simulation mit dem eddison Plug-in die Bewegung der Maschinen erfassen kann, müssen folgende Schritte durchlaufen werden:

1. Erstellen einer Projektdatei
2. Festlegen des Planungsbereiches und des Begrenzungsrahmens
3. Auswahl der zu positionierenden Planungsobjekte/Maschinen im Modell
4. Verknüpfung der Planungsobjekte mit den Markern

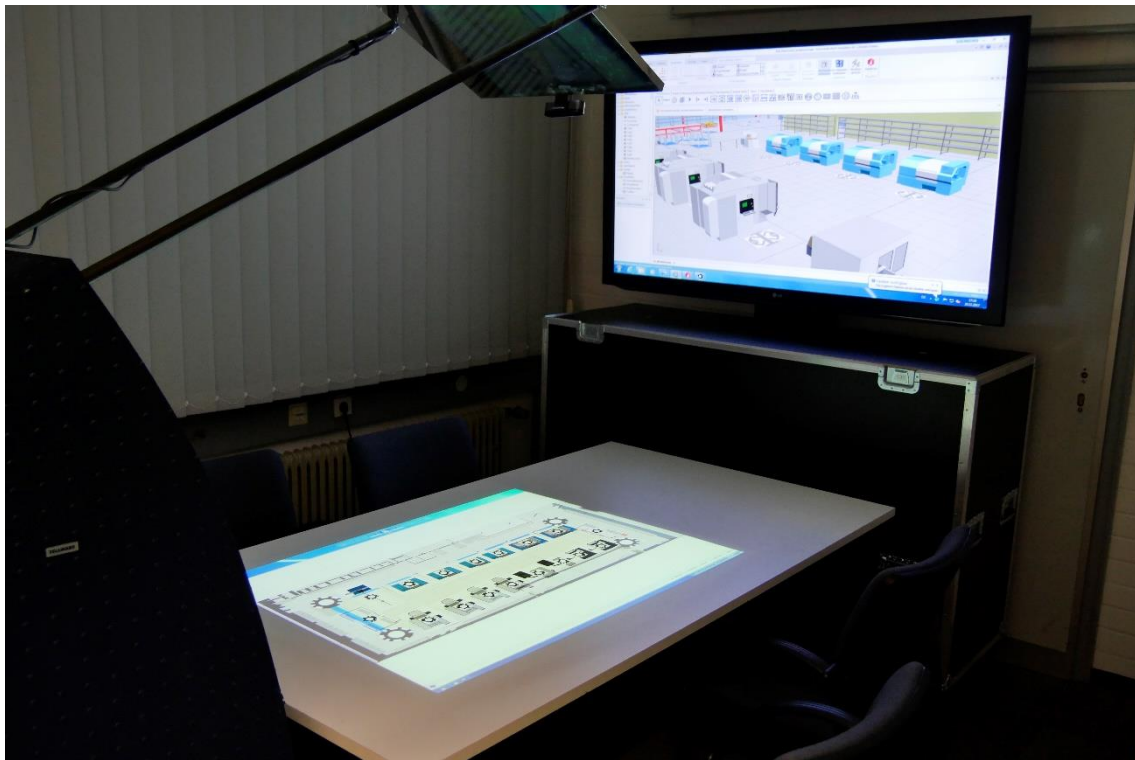
Zunächst wird eine Projektdatei erzeugt, in der alle Informationen zu den nachfolgenden Schritten gespeichert werden. Anschließend ist der zulässige Planungsbereich zu definieren. Dazu muss diesem Bereich ein rechteckiger Begrenzungsrahmen zugeordnet werden, der zudem am Planungstisch zur Orientierung und Wiedererkennung als Draufsicht projiziert wird.

Anschließend werden im Simulationsmodell alle Maschinen ausgewählt, die während der Planung verschiebbar sein sollen. Diese werden in eddison mit den entsprechend gekennzeichneten und mit Maschinengrundrissen hinterlegten Marker verknüpft. Zusätzlich können weitere Marker für sogenannte Point of View Kameras eingebunden werden, durch die eine Steuerung der Perspektiven in den durch den zweiten Projektor (oder Display) visualisierten 3D-Szenen möglich ist.

Für das Tracking der Marker wird eine Webcam mit 4K-Auflösung über der Planungsfläche installiert, die aufgrund des hochauflösenden Bildes eine gute Erkennung der Marker gewährleistet und zudem eine problemlose Anbindung an den verwendeten Rechner bietet. Über den Projektor des Planungstisches wird in Verbindung mit der Umlenkung über den Spiegel die Projektion des Grundrisses und der Begrenzungsmarker auf den Tisch realisiert. Die Anzeige der 3D-Ansicht erfolgt beispielsweise über einen zweiten Projektor oder durch ein großes 3D-



Display. In der nachfolgenden **Abbildung 54** ist die neue Konfiguration des Planungstisches mit einen Planungsbeispiel dargestellt.



**Abbildung 54:** Prototypische Umsetzung des Plant Simulation basierten Planungstisches im IMAB

Dieser Aufbau gewährleistet den Anwendern einen guten Überblick über den aktuellen Planungsstand und eine gute Interaktion, da von allen Plätzen ein Zugriff auf die Marker möglich ist. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden die Marker mit den jeweiligen Maschinengrundrissen hinterlegt und mit der am Gestell angebrachten Kamera aufgezeichnet. Die nachfolgende **Abbildung 55** zeigt die Erfassung der Maschinen auf dem Planungstisch mit der Projektion des Grundrisses mit den Begrenzungsmarkern.



**Abbildung 55: Kamerabasierte Erfassung der Positionen von Markern mit Maschinengrundrissen**

Das kamerabasierte Tracking erlaubt zudem die gleichzeitige Verschiebung mehrerer Marker unabhängig voneinander, wodurch keine Wartezeiten für das Ausführen von Einzelschritten entstehen. Neben der Positionierung der Maschinen können ebenfalls Marker zur Veränderung der auf dem Display dargestellten 3D-Perspektive verwendet werden. Diese sind als Point-of-View Kamera zu verknüpfen. Anschließend kann damit die Navigation durch die 3D-Ansicht durch einfaches Verschieben und Drehen erfolgen. Simultan dazu ist auch die Veränderung des Layouts im Simulationsmodell durch Touchdisplays bzw. Tablets möglich. Die Einbindung von Tablets zur Manipulation der Maschinen und Steuerung der 3D-Ansicht wird im nachfolgenden Kapitel 4.5.6 näher betrachtet.

Mit dem kamerabasierten Tracking der Marker wird eine einfache Verschiebung der Maschinen in Plant Simulation möglich. Dies erlaubt eine Verwendung der Simulationssoftware in Planungsteams, die über keine speziellen Simulationskenntnisse verfügen.

Die mathematisch bestimmten Anordnungslösungen werden durch die automatisierte Modellgenerierung in ein lauffähiges Simulationsmodell überführt und mit den 3D-Maschinen und Markern verknüpft. Anschließend kann durch das Planungsteam das Layout simulativ überprüft werden. Die Planungsrestriktionen, die nicht von der mathematischen Anordnungsoptimierung berücksichtigt werden konnten, lassen sich durch die einfache Interaktion mit dem 3D-Simulationsmodell auf diese Weise in einer partizipativen Planung umsetzen. Nachdem die Layoutanpassungen abgeschlossen sind, kann die Simulation erneut gestartet



werden, um die Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen. Dieser Prozess ist so lange iterativ zu durchlaufen, bis alle Planungsrestriktionen umgesetzt und durch die Planungsbeteiligten sowie die Simulationsergebnisse abgesichert sind.

#### **4.5.6 Einbindung von Virtual Reality**

Für die Fabrikplanung bietet der Einsatz von VR mehrere Vorteile, wie beispielsweise die Verringerung der Planungszeit, die Verbesserung der Planungsqualität oder auch eine erhebliche Senkung des Planungsaufwands und der damit verbundenen Kosten (Bracht und Eckert 2008, S. 2; Brosch 2014, S. 45). VR-Systeme ermöglichen die High-End-Visualisierung von Produkten, Layouts oder Prozessen und den virtuellen Rundgang durch die geplanten Anlagen oder Hallen. Dadurch wird das fachübergreifende Teamwork gefördert (Bracht und Eckert 2008, S. 2).

Der vom Nutzer wahrgenommene Grad der Immersion<sup>30</sup> wird durch die Verwendung von VR-Großprojektionen positiv beeinflusst (Brosch 2014, S. 45). Dadurch lassen sich Größenverhältnisse und Platzbedarf deutlich besser abschätzen und helfen dem Anwender, Planungsfehler oder Verbesserungsbedarf zu erkennen. Mit der VR-Großprojektion kann der partizipative Charakter erhalten und die Absicherung der Planungsergebnisse durch die 3D-Visualisierung erzielt werden.

Bereits 2005 zeigten (Bracht et al. 2005) die Relevanz der Verbindung von Ablaufsimulationen mit VR-Methoden auf und entwickelten einen Realisierungsansatz. Bisher mussten sowohl für die Verwendung des Planungstisches als auch für die 3D-Visualisierung im VR-Labor Vor- und Nacharbeiten durchgeführt werden.

Um die Durchgängigkeit im Planungsprozess zu steigern, erfolgte eine Kopplung des Planungstisches mit der VR-Großprojektion durch den Einsatz von Projekt-Datenbanken und eines Geometrieservers zur Verwaltung der Modelldateien (Bracht et al. 2005, S. 203). Dabei war jedoch eine doppelte Datenhaltung durch die systemspezifisch benötigten Datenformate nötig.

Die durchgängige Nutzung einer Software für alle zuvor genannten Anwendungen eliminiert Schnittstellenprobleme und den Aufwand für die Konvertierung, Aktualisierung und Speicherung der Daten.

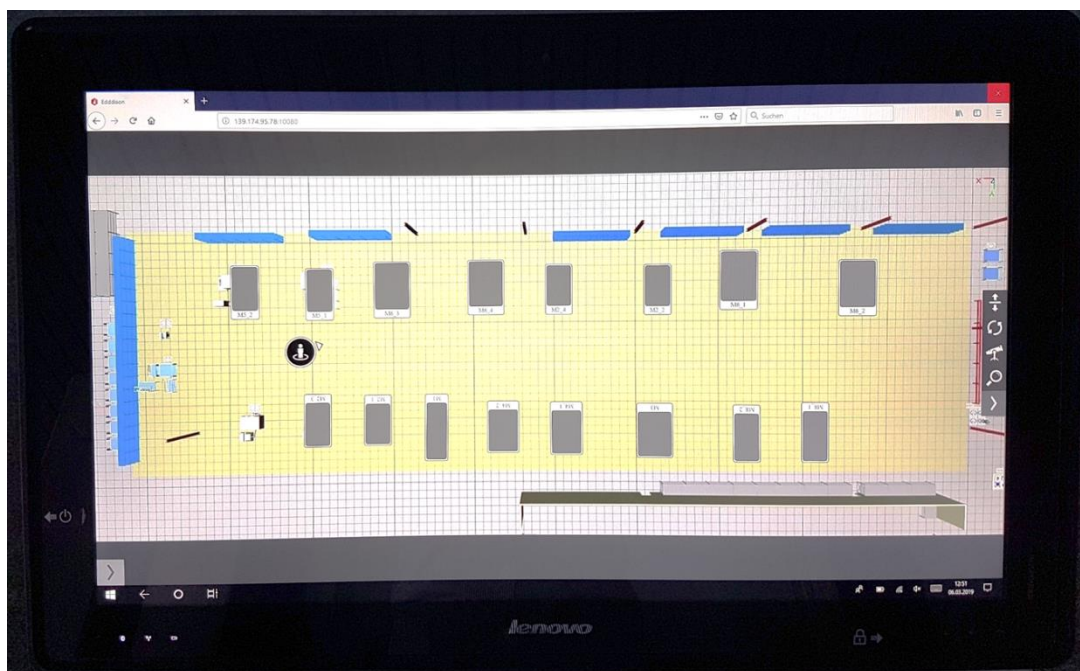
---

<sup>30</sup> Immersion beschreibt die Wahrnehmung und Identifikation des Anwenders mit der virtuellen Welt.

Der Einsatz von Plant Simulation für die Simulation und Visualisierung der 3D-Modelle lässt sich neben der Anwendung für den Planungstisch auch in der VR-Großprojektion einsetzen. Daher kann auch das am IMAB vorhandene VR-Labor mit einer Projektionsfläche von ca. 30 m<sup>2</sup> für die finale Absicherung der Layouts im Planungsprozess einbezogen werden. Die Darstellung der praktischen Umsetzung in diesem Kapitel beschreibt die für die vorliegende Arbeit eingesetzte Hardwarezusammenstellung. Die Umsetzungen lassen sich ebenfalls mit anderen Komponenten realisieren.

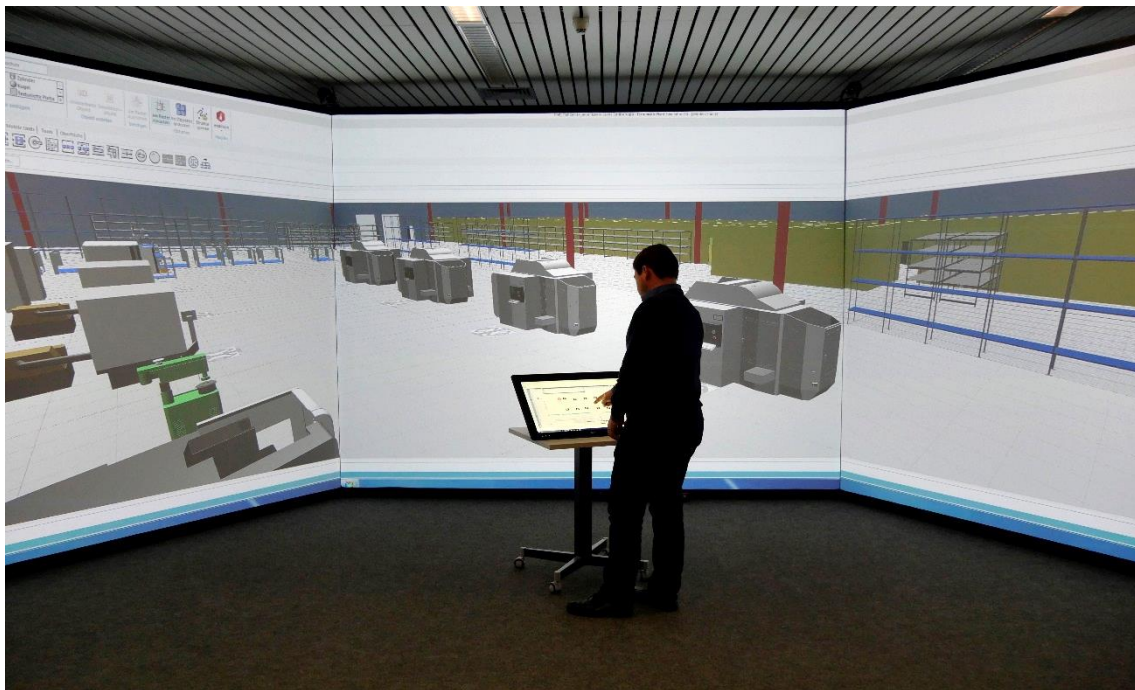
Im Vorfeld wurde bereits die Möglichkeit zur Darstellung von Plant Simulation im VR-Labor untersucht und nachgewiesen. Es werden alle drei Seiten des VR-Labors für die Abbildung der 3D-Layouts angesteuert. Die Synchronisation der einzelnen Projektionsflächen erfolgt dabei über einen Server. Das im Kapitel 4.5.5 beschriebene Plug-in ermöglicht ebenfalls die Interaktion und partizipative Planung im VR-Labor mit 3D-Simulationsmodellen aus Plant Simulation.

Im VR-Labor wird das Plant Simulation Modell mit dem optimierten Layout für die virtuelle Begehung und Absicherung geladen. Die zuvor erstellte Projektdatei (siehe Kapitel 4.5.5) mit den Planungsbereichen und beweglichen Maschinen wird geladen. Über eine Internetverbindung lässt sich ein Tablet koppeln, wodurch eine Interaktion mit den Maschinen und eine Navigation durch das 3D-Modell ermöglicht wird. Auf dem Tablet werden dabei eine Draufsicht des Planungsbereichs und die Positionen der verschiebbaren Maschinen sowie der Point of View Kamera dargestellt (**Abbildung 56**).



**Abbildung 56:** Planungsansicht auf dem Tablet

Über das Touchdisplay des Tablets kann die Point of View Kamera verschoben und somit die Ansicht der 3D-Szene im VR-Labor gesteuert werden. Bei der virtuellen Begehung des geplanten Layouts erkannter Anpassungsbedarf kann direkt mit der Verschiebung der Maschinen am Tablet (und synchron dazu im 3D-Modell) umgesetzt werden. Nach der Anpassung des Layouts können analog zur Vorgehensweise am Planungstisch ein erneuter Simulationslauf durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet werden. **Abbildung 57** zeigt die Verbindung von Plant Simulation und Tablet basierter Steuerung im VR-Labor des IMAB.



**Abbildung 57: Tablet-basierte Interaktion mit Plant Simulation im VR-Labor des IMAB**

Über einen 27“ großen Tablet-PC wird die Bedienoberfläche zur Navigation durch die 3D-Szene sowie die beweglichen Objekte angezeigt. Die Verschiebung der Maschinen erfolgt durch die Auswahl (Antippen der Maschine) und das Ziehen mit dem Finger an die gewünschte Position. Rotationsbewegungen zur Ausrichtung der Maschinen sind ebenfalls möglich und werden durch Antippen und Drehen mit zwei Fingern vollzogen.

Mit der eingebundenen Point-of-View Kamera wird eine Bewegung durch die 3D-Szene und somit der virtuelle Rundgang auf Augenhöhe ermöglicht. Die Bedienung erfolgt analog zur Verschiebung der Maschinen. Abschließend können, wie auch bei dem Planungstisch, alle beschriebenen Analysefunktionen des Simulationsmodells uneingeschränkt während der Planung genutzt werden.

## 4.6 Die Gesamtmethodik TOMAS

Anhand der aus dem Forschungsbedarf abgeleiteten Anforderungen und Zielsetzungen zur Entwicklung einer neuen Gesamtmethodik für die Layoutplanung wurden drei wesentliche Themenfelder identifiziert. Diese beziehen sich auf die Einbindung der mathematischen Anordnungsoptimierung in den Planungsprozess, den effizienten Simulationseinsatz in der Planung sowie die Unterstützung und Absicherung der Planung durch Partizipation und VR.

Aufbauend auf den zuvor erarbeiteten Teilergebnissen aus den genannten drei Bereichen erfolgt deren Einsatz in einer Gesamtmethodik zur TransportOptimierten, Materialflussorientierten AnordnungsSimulation, die im weiteren Verlauf unter dem Akronym TOMAS zusammengefasst wird.

Die Gesamtmethodik TOMAS beruht auf der Kombination der mathematischen Anordnungsoptimierung mit der Simulation, der simulationsgestützten partizipativen Planung und dem Einsatz von VR. Durch die Kombination dieser Elemente soll der Layoutplanungsprozess gezielt verbessert und unterstützt werden.

Der Ablauf der Gesamtmethodik TOMAS ist durch einen steigenden Detaillierungsgrad gekennzeichnet und soll die Vorteile der enthaltenen Elemente während des Planungsablaufs miteinander kombinieren. Der Aufbau ist durch vier Hauptphasen gekennzeichnet. Ausgehend von einer mathematisch optimierten Anordnung (Phase 1) wird in Verbindung mit dynamischen Daten automatisiert ein Simulationsmodell erzeugt (Phase 2). Darauf aufbauend werden Layouts partizipativ und simulationsgestützt geplant sowie abgesichert (Phase 3). Der Planungsprozess endet mit der Freigabe des zu realisierenden Layouts (Phase 4).

Für die Gesamtmethodik ergibt sich aus dieser Reihenfolge der vier Hauptphasen der in **Abbildung 58** dargestellte Ablauf.

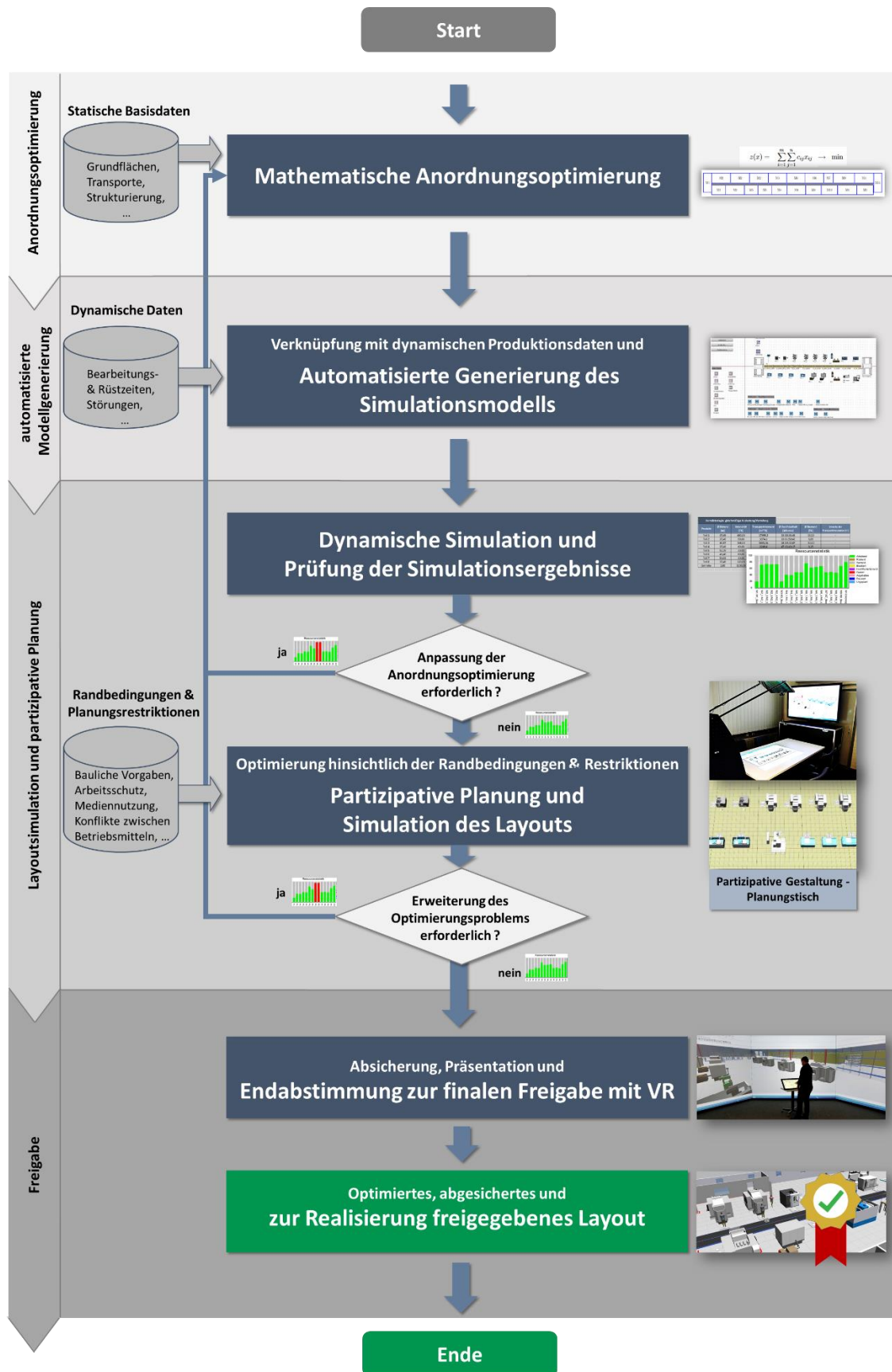


Abbildung 58: Ablauf der entwickelten Gesamtmethodik



Die vier Hauptphasen „Anordnungsoptimierung“, „automatisierte Modellgenerierung“, „Layoutsimulation und partizipative Planung“ und „Freigabe“ werden nacheinander durchlaufen. Dabei sind Rückkopplungen und Iterationen möglich. Die Gesamtmethodik ist bei einer Neuplanung vollständig zu durchlaufen. Für die Umplanung während der Betriebsphase kann, aufbauend auf den Ausführungen in Kapitel 2.4.3 und in Anlehnung an Brosch, ein verkürzter Ablauf erfolgen. Nachfolgend werden zunächst alle in den Hauptphasen zu durchlaufenden Schritte erläutert. Anschließend wird der verkürzte Ablauf für die Umplanung vorgestellt.

### **Anordnungsoptimierung**

Der Planungsprozess beginnt mit der Durchführung der Anordnungsoptimierung. Dabei wird eine mathematisch optimierte Anordnung für die Layoutplanung aufgrund der statischen Basisdaten ermittelt. Zu den statischen Basisdaten zählen z.B. die Transportmatrix, die Maschinengrundflächen und Strukturierungskriterien. Aufgrund der hohen Lösungsqualität und der Möglichkeit Strukturvorgaben (wie z.B. die Positionen von Warenein- und -ausgängen) zu berücksichtigen, ist das DRFLP-Verfahren bevorzugt einzusetzen. Durch die frühe Berücksichtigung solcher Vorgaben in der mathematisch optimierten Anordnung lässt sich der Anpassungsaufwand bei der Planung des Reallayouts verringern.

Sind verhältnismäßig große Instanzen, d.h. Anordnungsprobleme mit z.B. deutlich mehr als 21 Maschinen zu lösen, steigt die Berechnungsdauer stark an. Um dies zu vermeiden, kann das verbesserte heuristische Verfahren eingesetzt werden. Dessen Lösungsqualität wird in Kapitel 5 mit einem durch das DRFLP ermittelte Optimum verglichen.

### **Automatisierte Modellgenerierung**

Die Kopplung von Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation wird durch das entwickelte Basis-Simulationsmodell ermöglicht, welches auf Grundlage der Anordnungsoptimierung und der dynamischen Daten automatisiert layoutspezifische Modelle generiert. Die mathematisch optimierte Anordnung wird dafür in das Basis-Simulationsmodell importiert. Zusätzlich werden dynamische Daten zur Simulation des Layouts in das Modell geladen. Zu den dynamischen Daten zählen alle Informationen, die zur Steuerung der Produktions- und Logistikabläufe erforderlich sind. Dynamische Daten umfassen beispielsweise Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten, Produktionsreihenfolgen oder Störungen.

Anschließend wird das layoutspezifische Simulationsmodell automatisch generiert. Mit diesem Modell wird die zielgerichtete Durchführung und Auswertung von Simulationsläufen in Hauptphase 3 ermöglicht.

### **Layoutsimulation und partizipative Planung**

Im Anschluss an die automatisierte Modellgenerierung werden Simulationsexperimente durchgeführt und die Ergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen ausgegeben. Die Simulationsergebnisse bilden die Grundlage für eine Bewertung des erzeugten Layouts und geben Aufschluss darüber, ob die Ergebnisse der Anordnungsoptimierung mit den grundlegenden Planungsvoraussetzungen für die weitere Planung geeignet sind oder ob eine Anpassung bei der Anordnungsoptimierung erforderlich ist.

Anpassungsbedarf kann sich beispielsweise durch eine Veränderung der Transportmatrix ergeben, welche durch die dynamisch ermittelten Simulationsergebnisse beeinflusst wird. Dies geschieht beispielsweise, wenn die zuvor statisch ermittelte erforderliche Maschinenkapazität in den Simulationsläufen aufgrund von dynamisch auftretenden Störungen oder Blockaden nicht erreicht werden kann. Wird wegen nicht erreichter Kapazitätsziele eine Erweiterung des Maschinenparks notwendig, muss gleichzeitig auch die Erweiterung der Transportmatrix erfolgen und eine neue, optimierte Anordnung mit der neuen Maschinenanzahl ermittelt werden.

Mit den beschriebenen DRFLP-Verfahren und der weiterentwickelten Heuristik liegen effiziente Methoden vor, um mathematisch optimierte Anordnungen für die Layoutplanung zu erzeugen. Insbesondere Methoden zur Lösung des DRFLP bieten eine hohe Lösungsqualität für dieses Optimierungsproblem. Allerdings kann in den mathematischen Verfahren nicht vollumfänglich die Vielzahl der planungsrelevanten Zielsetzungen berücksichtigt werden.

Sobald eine durch die dynamische Simulation abgesicherte Anordnung vorliegt, erfolgt im nächsten Schritt eine Detaillierung und Optimierung des Layouts hinsichtlich der Rahmenbedingungen und Planungsrestriktionen. Um diese bei der Layoutgestaltung einzubeziehen, wird der Planungstisch eingesetzt. Dieser ermöglicht zusätzlich die partizipative Gestaltung des Layouts durch mehrere Teilnehmer einer Planungssitzung. Durch die partizipative Planung kann das Fachwissen der betroffenen Mitarbeiter aus den Produktionsbereichen genutzt und gleichzeitig die Akzeptanz für das Planungsergebnis gesteigert werden.

Da auch der Planungstisch direkt mit dem Simulator verbunden ist, lassen sich die Simulationsläufe direkt durchführen und die Ergebnisse auswerten. Anhand der Simulationsergebnisse ist es den Planern möglich, die Auswirkungen ihrer

Layoutanpassungen zu beurteilen und auszuwerten, ob die Zielsetzungen (z.B. hinsichtlich Kapazitäten und Durchlaufzeiten) erreicht werden.

Für den Fall, dass bei der Detaillierung und Optimierung des Layouts hinsichtlich der Planungsrestriktionen durch die Simulation nachgewiesen wird, dass grundlegende Zielsetzungen der Planung nicht zu erreichen sind und eine neue optimierte Anordnung zu ermitteln ist, werden die zuvor beschriebenen Schritte nochmals iterativ durchlaufen. Nach der simulativen Absicherung des Layouts folgt Hauptphase 4.

### **Freigabe**

Das partizipativ geplante Layout wird im VR-Labor visualisiert. Durch die immersive Darstellung im 1:1 Maßstab wird den Planungsbeteiligten eine virtuelle Begehung ermöglicht. Dabei lassen sich die räumlichen Gegebenheiten überprüfen und die Realisierbarkeit final absichern. Eine Manipulation der Maschinenpositionen kann auch in diesem Schritt noch erfolgen und bei Bedarf direkt über die Materialflusssimulation analysiert werden.

Abschließend wird die VR-Visualisierung für die Präsentation der Planungsergebnisse eingesetzt und somit eine einheitliche Kommunikationsgrundlage geschaffen. Auf dieser Basis erfolgt die Endabstimmung (z.B. mit Entscheidungsträgern, Vorgesetzten und Betriebsräten) zur finalen Freigabe. Nach diesem Schritt ist die Gesamtmethodik vollständig durchlaufen und es liegt ein abgesichertes und zur Realisierung freigegebenes Layout vor.

Die Gesamtmethodik ist bei einer Neuplanung vollständig zu durchlaufen. Für die Umplanung während der Betriebsphase ist es hingegen sinnvoll, den Planungsprozess zielgerichtet zu verkürzen. Im Rahmen einer schnellen Anpassung des Layouts an die geänderten Rahmenbedingungen sind die Schritte Endpräsentation und Freigabe mittels VR nicht erforderlich, da die räumliche Positionierbarkeit der einzelnen Maschinen bereits während der Neuplanung abgesichert wurde. Die vierte Hauptphase muss daher bei Umplanungen nicht durchlaufen werden.

Darüber hinaus ist je nach Komplexität und Umfang zu prüfen, ob die mathematisch optimierten und simulativ abgesicherten Layouts weiteren Planungsaufwand erfordern und somit der Schritt der partizipativen Planung durchgeführt werden muss.



Dies ermöglicht eine Zeitersparnis und bietet daher für häufige bzw. kontinuierliche Planungsaufgaben zur Anpassung auf neue Rahmenbedingungen einen Vorteil.

Bei der Umplanung liegt daher der Fokus auf den Hauptphasen „Anordnungsoptimierung“, „automatisierte Modellgenerierung“ und „Layoutsimulation und partizipative Planung“. In der dritten Hauptphase wird nach dem Schritt der „dynamischen Simulation und Prüfung der Simulationsergebnisse“ analysiert, ob weitere Randbedingungen Planungsrestriktionen zu berücksichtigen sind. Ist dies der Fall folgt die partizipative Planung. Werden vorher bereits alle Anforderungen abgedeckt, ist das Abbruchkriterium erreicht und der Planungsprozess endet.

Wenn durch die Anordnungsoptimierung bereits alle Anforderungen an das Layout erfüllt sind und dies durch die Simulation abgesichert wird, kann der Planungsprozess beendet werden. Dieser Prozessverlauf ist besonders auf die Planung von Produktionslayouts mit mobilen Produktionsressourcen, die frei in einer Halle mit Medienversorgungsraster angeordnet werden können, geeignet. Falls weitere Bedingungen und Vorgaben bei der Planung einbezogen werden müssen, deren Berücksichtigung nicht bei der Anordnungsoptimierung möglich ist, erfolgt die partizipative Planung und simulative Absicherung.

In der nachfolgenden **Abbildung 59** ist der verkürzte Planungsprozess mit der Gesamtmethodik für die Umplanung dargestellt.

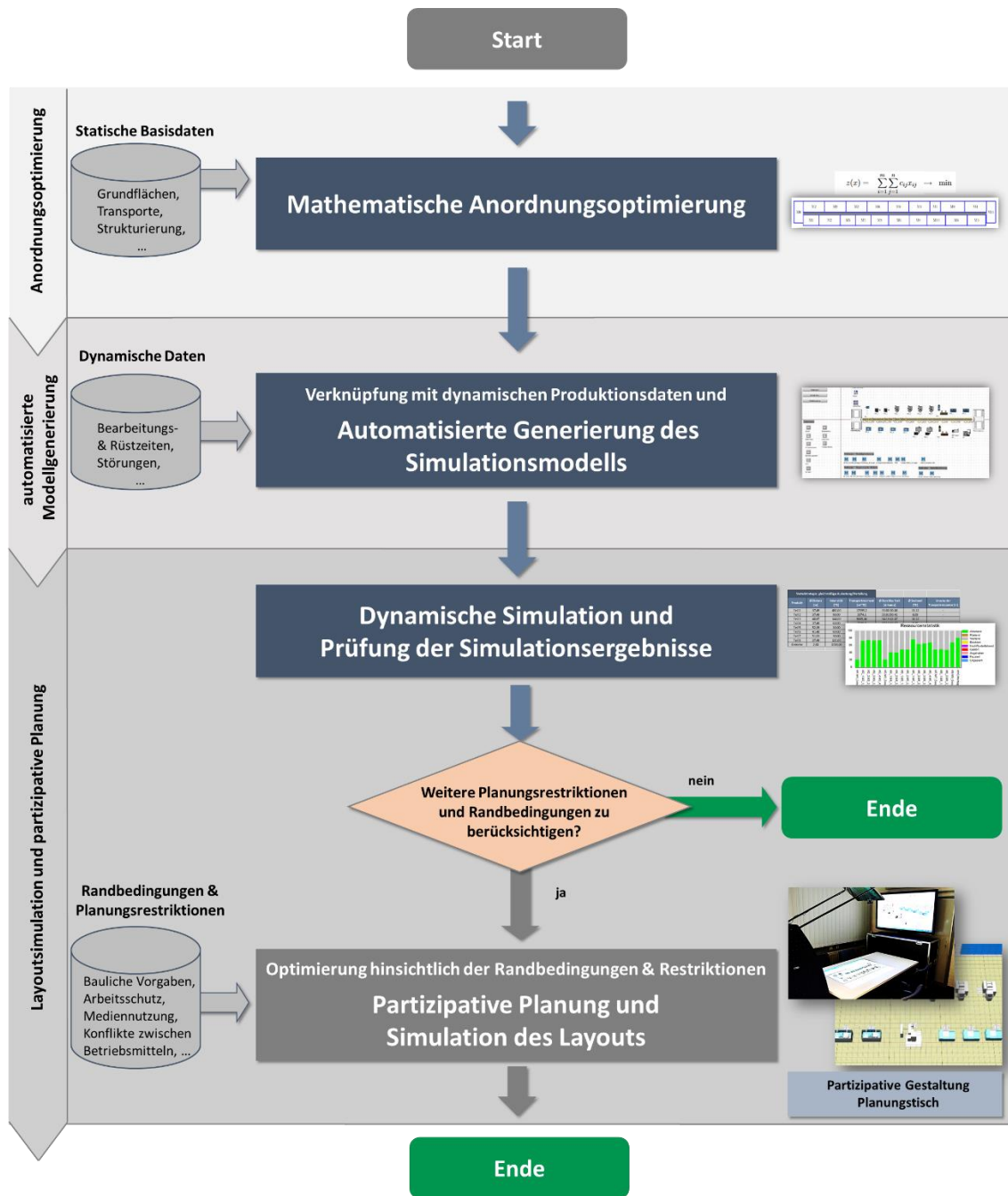


Abbildung 59: Gesamtmethodik - Verkürzter Planungsprozess für die Umplanung

Im nachfolgenden Kapitel 4.7 folgt eine Darstellung der organisatorischen Rahmenbedingungen und eine Einordnung der Verantwortlichkeiten und Mitarbeiterstrukturen für die Planung mit TOMAS. Die praktische Anwendung der Gesamtmethodik wird anschließend in Kapitel 5 anhand einer Neuplanung und einer wiederholten Umplanung beschrieben.

## **4.7 Organisatorische Rahmendbedingungen für den Einsatz von TOMAS**

Für den Einsatz der Gesamtmethodik in der Neu- und in der Umplanung gilt es für jedes Unternehmen spezifisch festzulegen, welche Mitarbeiter an der Planung zu beteiligen sind und wie die Planung organisiert wird. Im Folgenden wird jeweils eine grundsätzliche Einordnung für die Neuplanung und die Umplanung beschrieben, die entsprechend die betrieblichen Gegebenheiten anzupassen ist. Die Kriterien, nach denen diese Anpassung vorzunehmen sind, beziehen sich allgemein auf die Unternehmensgröße, die Abteilungs- und Mitarbeiterstruktur sowie auf die Komplexität der Planung.

Die Neuplanung eines Produktionslayouts ist charakterisiert durch ihre Einmaligkeit und wird daher klassischerweise in Form eines Projektes durchgeführt. Dabei wird ein Projektleiter benannt, der die Planung koordiniert und die entsprechenden Mitarbeiter in den jeweiligen Planungsphasen in den Prozess einbindet.

Die Aufbereitung der Datenbasis zur Durchführung der Anordnungsoptimierung und der automatisierten Modellgenerierung ist dabei von planungserfahrenen Mitarbeitern durchzuführen. Im Rahmen der partizipativen Planung sind jeweils problembezogen z.B. Mitarbeiter und Meister aus den Produktionsbereichen, Produktionsleiter und Vertreter der Arbeitssicherheit einzubeziehen. Im Freigabeprozess können dann, in Abhängigkeit von den betrieblichen Konstellationen, beispielsweise Entscheidungsträger und Betriebsräte für die finale Abstimmung und Freigabe hinzugezogen werden.

Umplanungen während der Betriebsphase werden aufgrund der wechselnden Herausforderungen für die Unternehmen, immer häufiger bzw. regelmäßig durchgeführt. Abhängig von der Frequenz, in der die Planungsaufgaben anfallen, kann es eine sinnvolle Lösung darstellen, eine entsprechende Stelle bzw. Position für die Koordination und Durchführung der Planung einzurichten.

Insbesondere bei kurzen Planungszyklen und der damit verbundenen laufenden Anpassung der Produktionslayouts, die sich z.B. durch wechselnde Produktionsprogramme ergeben, ist diese Position als Schnittstelle zwischen Produktions- und Fabrikplanung anzusehen. Dabei muss individuell festgelegt werden wie eine solche Stelle zu gestalten ist.

---

Die Anwendung der Gesamtmethodik für die Umplanung kann daher schwerpunktmäßig durch den Mitarbeiter in dieser neuen Position durchgeführt werden. Abhängig von der Planungssituation und der Komplexität kann er überprüfen und entscheiden, ob das auf der mathematischen Anordnungsoptimierung basierende Layout den neuen Anforderungen vollständig gerecht wird. Ist dies nicht der Fall, muss er die betroffenen Mitarbeiter mit dem erforderlichen Fachwissen auswählen und in die Planung einbinden.

## 5 Praktische Anwendung der Gesamtmethodik und Vergleich der Anordnungsverfahren

Die Anwendung der Gesamtmethodik TOMAS zur TransportOptimierten, Materialflussorientierten AnordnungsSimulation mit partizipativen Werkzeugen und VR sowie der Einsatz der darin enthaltenen Modelle und Teilmethoden wird in diesem Kapitel anhand von zwei Beispielen beschrieben. Dabei wird TOMAS für die Neuplanung sowie für die Planung während des Betriebes angewendet.

Anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Schneckengetriebefertigung wird der Einsatz der Gesamtmethodik mit den zu durchlaufenden Schritten praktisch dargestellt. In einem zweiten Planungsbeispiel wird die Gesamtmethodik für die (Um-) Planung von Layouts für veränderte Auftragslagen und neue Produktionsszenarien während der Betriebsphase angewendet.

Dabei erfolgt der Einsatz von TOMAS zunächst zur Analyse des bestehenden Layouts. Durch den Vergleich mit einer auf die neuen Rahmenbedingungen angepassten und optimierten Anordnungslösung wird der Wandlungsbedarf bzw. das durch die Wandlung des Layouts mögliche Produktionspotential untersucht. Dafür wird die Gesamtmethodik zur Planung von neuen, optimierten Layouts bei wechselnden Produktionsaufträgen zur Berücksichtigung der geänderten Rahmenbedingungen eingesetzt.

Es erfolgt jeweils eine kurze Einführung in das zugrunde gelegte Planungsbeispiel und die Rahmenbedingungen. Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst die für die Gesamtmethodik eingesetzten Verfahren zur Anordnungsoptimierung hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen.

### 5.1 Vergleich der Anordnungsverfahren

Zunächst werden auf Basis eines Planungsbeispiels Standardverfahren der Anordnungsoptimierung, die weiterentwickelte Heuristik und die Methoden zur Lösung des DRFLP angewendet und die Lösungsqualität der jeweiligen Verfahren durch Simulation analysiert. Die Ergebnisse der Verfahren werden anschließend gegenübergestellt. Dabei soll die Lösungsqualität des DRFLP und der verbesserten Heuristik im Vergleich zu klassischen Standardverfahren aufgezeigt werden.

### 5.1.1 Einführung in das Planungsbeispiel – Neuplanung und Vergleich der Anordnungsverfahren

Für die Anwendung der Gesamtmethodik bei einer Neuplanung wird ein Planungsbeispiel aus der Lehre verwendet, welches auf einem realen Fabrikplanungsprojekt basiert. Dieses komplexe Fallbeispiel wurde von Prof. Dr.-Ing. Uwe Prêt von der HTW Berlin ausgearbeitet und bezieht sich auf die Produktion eines Stirnrad-Schneckengetriebes, das durch das Unternehmen Getriebebau NORD GmbH & Co. KG DRIVESYSTEM Bargteheide hergestellt wird (Prêt 2017, S. 2). Dieses Beispiel stellt aufgrund der ausführlichen Datenbasis sowie der realistischen Planungsanforderungen eine fundierte Basis für die Anwendung von TOMAS dar.

Ziel dieses komplexen Beispiels ist die Planung eines Produktionslayouts für die Herstellung von acht verschiedenen Einzelteilen, die mit Zukaufteilen zu einem fertigen Getriebe montiert werden. Die zu produzierenden Zwischenprodukte lassen sich in drei Teilefamilien unterteilen:

- **Gehäuse**: Gussteile, Hauptbearbeitung durch Fräsen und Bohren
- **Wellen**: Rundstäbe, Hauptbearbeitung durch Sägen (Ablängen), Drehen und Rundschleifen (teilweise Wälzschleifen)
- **Zahnräder**: Gesenkschmiedeteil, Hauptbearbeitung durch Drehen, Fräsen, Räumen, Schleifen und Wälzen

Zu den Einzelteilen liegen die Bearbeitungsreihenfolgen und Prozesszeiten vor. In der nachfolgenden **Abbildung 60** sind die zu produzierenden Einzelteile, die Zukaufteile sowie das fertige Endprodukt dargestellt.

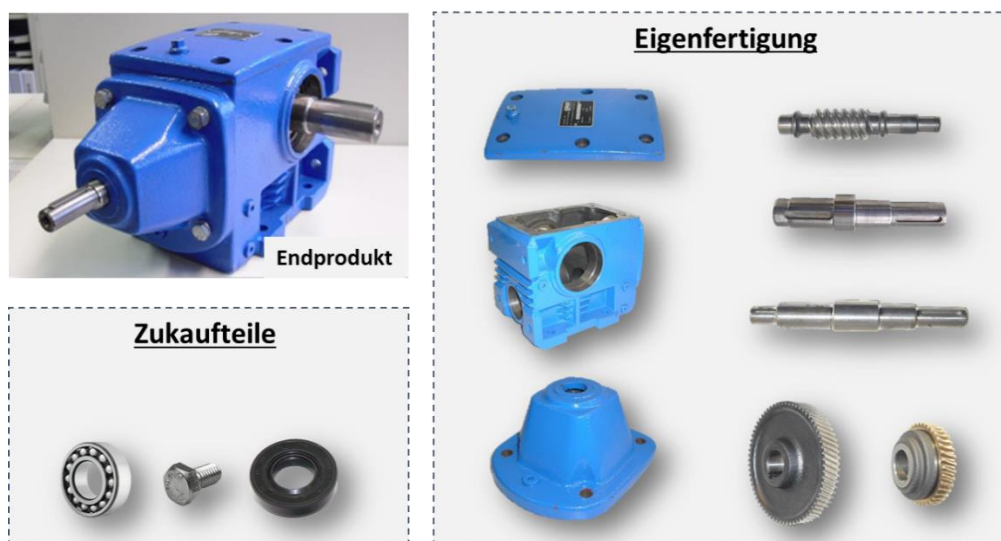
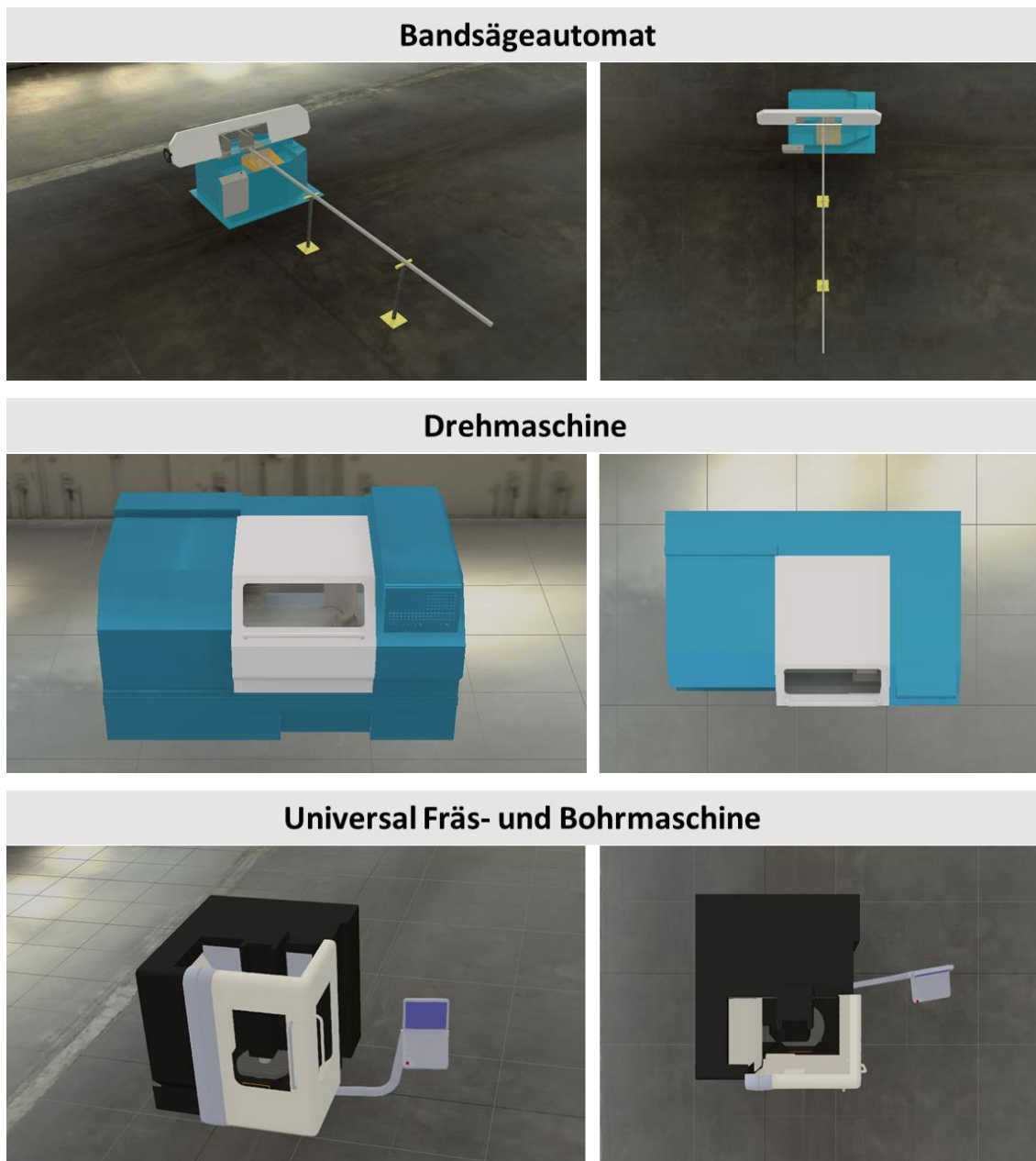
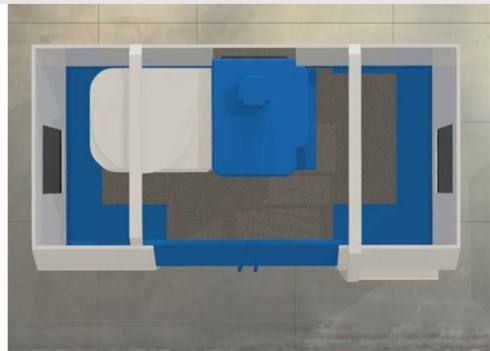
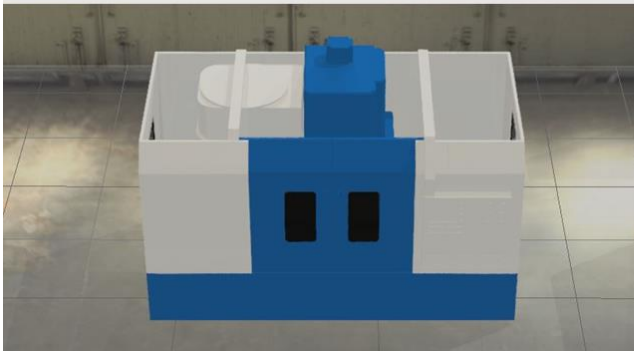


Abbildung 60: Übersicht der Teile in Eigenfertigung, der Zukaufteile und des Endprodukts [Quelle der Einzelbilder: (Prêt 2017)]

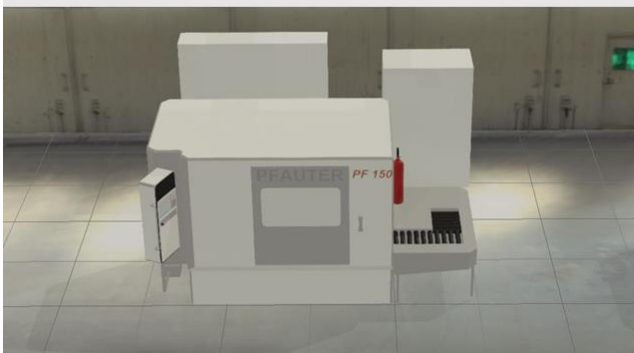
Für die Produktion der acht verschiedenen Einzelteile in Eigenfertigung stehen insgesamt neun verschiedene Maschinentypen zur Verfügung, die für die Bearbeitung der Gehäuse, Wellen und Zahnräder benötigt werden. Damit die benötigten Mengen gefertigt werden können, kommen teilweise Maschinen eines Typs mehrfach vor, wie z.B. Dreh- oder Fräsmaschinen. Nachfolgend werden die Maschinen und Arbeitsplätze, die im Rahmen der Layoutplanung anzuordnen sind, in **Abbildung 61** dargestellt.



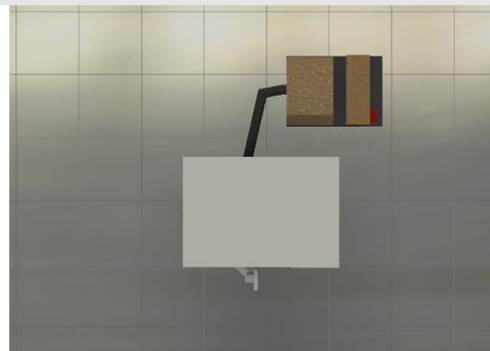
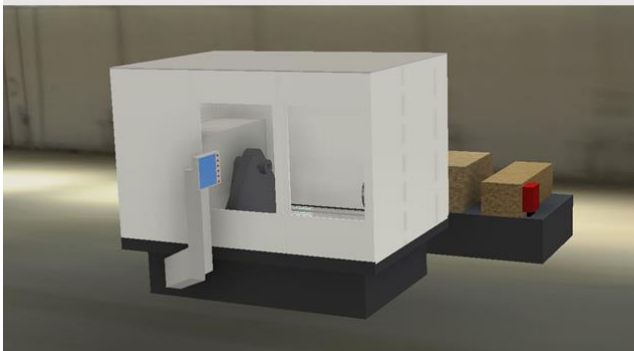
**Wälzmaschine**



**CNC-Wälzfräsmaschine**



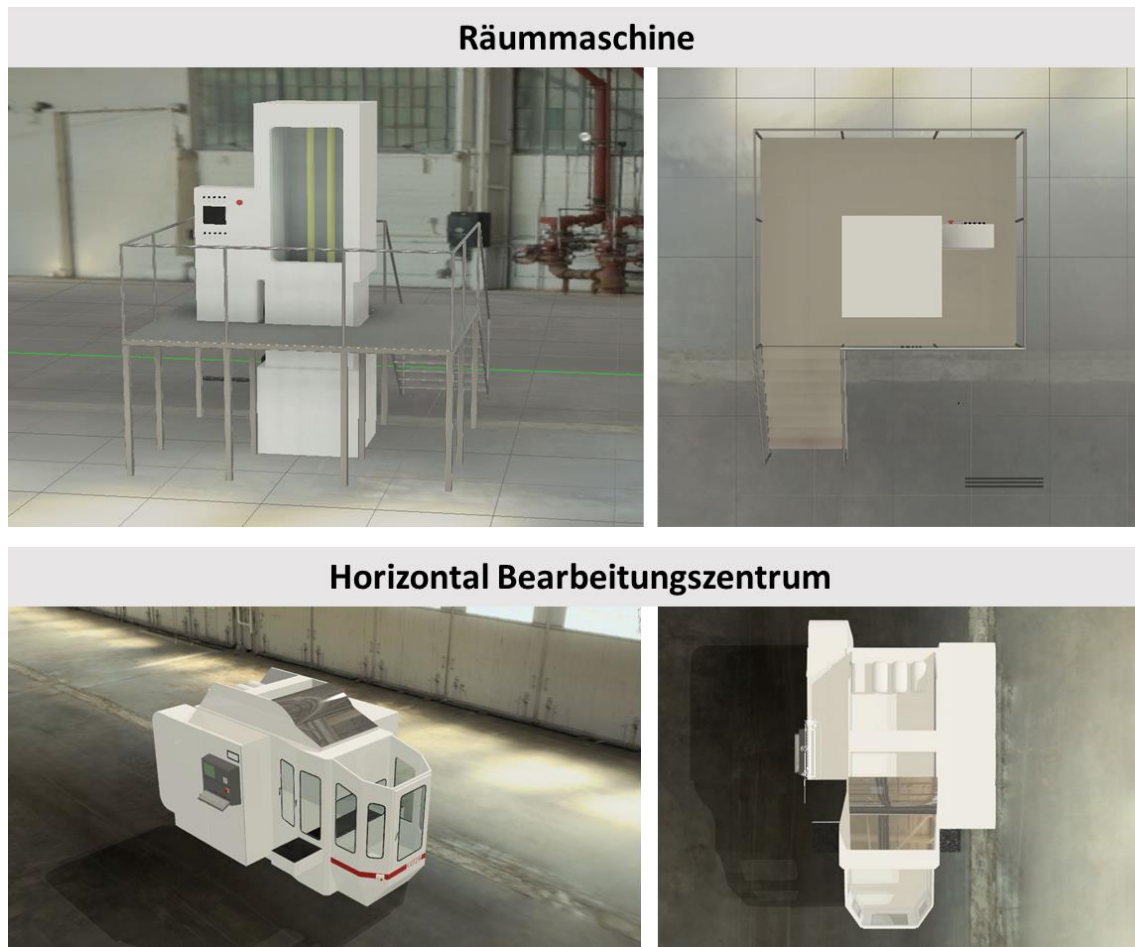
**CNC-Rundscheifmaschine**



**Handarbeitsplatz (Entgraten, Montage)**







**Abbildung 61: Maschinenpark zur Produktion der Getriebe**

Die dargestellten Maschinen und die untereinander herrschenden Transportbeziehungen bilden die Basis für die Anordnungsoptimierung. Das Beispiel wurde für die Untersuchungen erweitert und zusätzlich ein Handarbeitsplatz für die Endmontage der Getriebe in die Transportmatrix eingefügt (siehe Abbildung 61), um diesen direkt bei der Anordnungsoptimierung berücksichtigen zu können.

Die Losgrößen für die Produktion der acht verschiedenen Einzelteile werden wie im Fallsbeispiel von Prêt um die Hälfte verringert, um kürzere Durchlaufzeiten zu erhalten. In der nachfolgenden **Tabelle 6** sind die zu produzierenden Losgrößen je Einzelteil für die Herstellung der Schneckengetriebe aufgeführt.

Tabelle 6: Losgrößen der zu produzierenden Einzelteile

Teil	Losgröße	Lose/Jahr
Schnecken-Fußgehäuse	450	80
Gehäusedeckel	1200	30
Antriebsgehäuse	750	48
Antriebswelle	1200	30
Antriebsritzel	1200	30
Schnecke	1200	30
Antriebsrad	1200	30
Antriebswelle	900	40

Im ersten Teil der praktischen Anwendung wird ein Jahresproduktionsprogramm von 36.000 Schneckengetrieben mit den zuvor genannten Losgrößen der Einzelteile zu Grunde gelegt. Die Schneckengetriebe werden dabei kontinuierlich und über das Jahr gleich verteilt hergestellt und konstant vom Kunden aus dem Lager abgerufen, d.h. es liegen keine saisonalen Schwankungen oder ähnliches vor.

Anhand dieses Planungsbeispiels wird zunächst die Lösungsqualität der DRFLP-Methoden, der weiterentwickelten Heuristik und einem häufig in der Fabrikplanung verwendeten Anordnungsverfahren (dem Dreiecksverfahren nach Schmigalla) untersucht.

Anschließend wird die Anwendung der entwickelten Gesamtmethodik an dem vorgestellten Anwendungsbeispiel schrittweise durchlaufen und ein Layout entwickelt.

Im nachfolgenden Kapitel 5.1.2 erfolgt ein Vergleich der Lösungsqualität der Anordnungsverfahren anhand des Anwendungsbeispiels.

### 5.1.2 Vergleich der Verfahren zur Anordnungsoptimierung

In diesem Abschnitt wird die in Kapitel 4.3.1 entwickelte Heuristik zur Erzeugung einer transportoptimierten Anordnung mit der exakten Lösung des DRFLP sowie einer händischen Lösung auf Basis des Dreiecksverfahrens verglichen und simulativ untersucht.

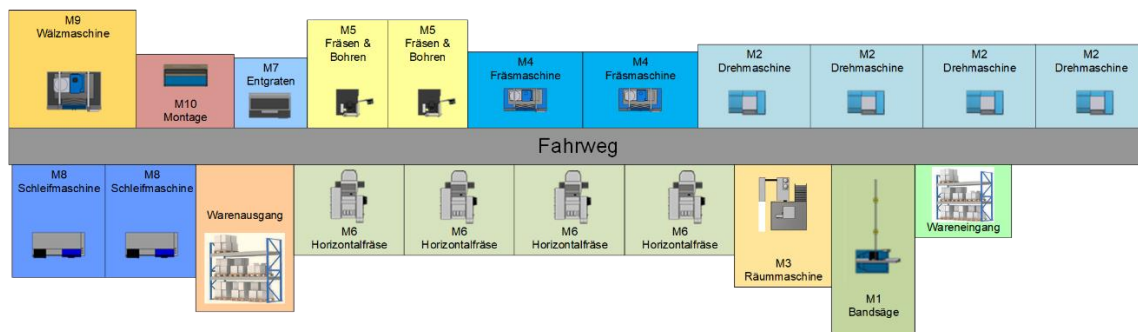
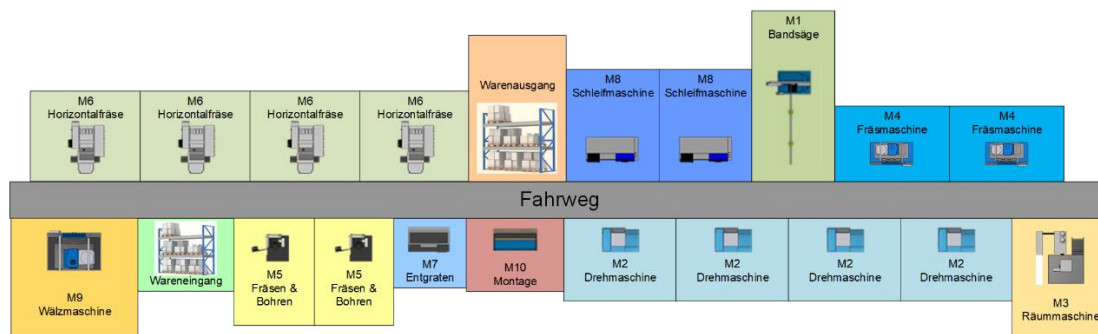
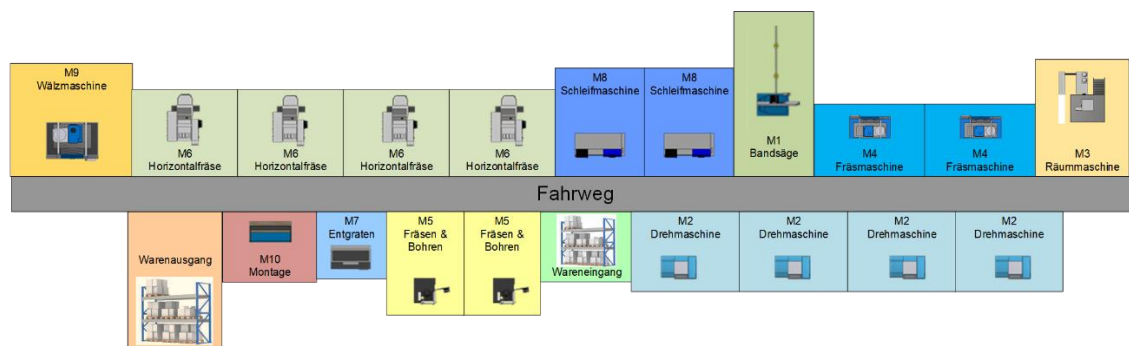
Die Erzeugung der transportoptimierten Anordnungen erfolgt ohne Vorgabe von Planungsrestriktionen, wie z.B. der Bestimmung von festen Positionen für die Warenein- und Warenausgänge. Auf der Grundlage des vorgestellten Planungsbeispiels wird im Folgenden ein Vergleich der Verfahren zur Anordnungsoptimierung anhand der Simulationsergebnisse durchgeführt.

Das Dreieckverfahren nach Schmigalla wurde händisch gelöst und an die Wegestruktur angepasst.

Der Simulator berechnet die weiterentwickelte Heuristik und überführt diese direkt in ein lauffähiges Simulationsmodell. Dieser Vorgang dauert unter einer Sekunde.

Für die Lösung des DRFLP betrug die Rechenzeit des Solvers weniger als eine Minute, wenn die Maschinen gleichen Typs als zusammenhängende Fläche eingeplant werden (Blockbildung). Die Berechnung der optimalen Anordnung für alle Maschinen mit insgesamt 21 einzelnen Grundflächen war in weniger als 14 Stunden möglich.

In der nachfolgenden **Abbildung 62** sind die durch die drei verschiedenen Verfahren optimierten Anordnungen dargestellt.

**Anordnung 1 - händische Lösung (mit Dreiecksverfahren)****Anordnung 2 - weiterentwickelte Heuristik****Anordnung 3 - Double-Row-Facility-Layout-Problem****Abbildung 62: Optimierte Anordnung der Maschinen durch die drei Anordnungsverfahren**

Die drei Anordnungsvarianten weisen unterschiedliche Positionen für die Warenein- und -ausgänge auf. Bei der händischen Lösung mit dem Dreiecksverfahren haben diese den größten Abstand. Die weiterentwickelte Heuristik sowie das DRFLP weisen Ähnlichkeiten bei den Anordnungen auf.

Die größeren Abweichungen von Anordnung 1 zu den Anordnungen 2 und 3 sind darauf zurückzuführen, dass bei dem Dreiecksverfahren keine realen Abstände zwischen den Maschinen berücksichtigt werden. Dadurch ist eine Abweichung bei

der Berechnung des Transportmoments zu erwarten. Bei der Ermittlung von Anordnung 2 wurden diese Transportdistanzen berücksichtigt. Anordnung 1 und 2 stellen hinsichtlich der zugrundeliegenden Heuristiken zulässige Optimierungslösungen dar. Die mittels DRFLP bestimmte Anordnung 3 stellt ein exakt bestimmtes Optimum dar.

In das Simulationsmodell werden die Maschinenpositionen aus den Layouts importiert und anschließend simuliert. Um vergleichbare Ergebnisse zu schaffen, muss während der Simulation die gleiche Annahme wie bei den Anordnungsverfahren getroffen werden. Daher wurden die Simulationsläufe mit der Verteilstrategie „gleichmäßige Auslastung“ durchgeführt, da bei der Anordnung davon ausgegangen wird, dass sich die Transporte gleichmäßig auf alle Maschinen eines Typs verteilen. Bei der Simulation wird, wie auch bei den verwendeten Anordnungsverfahren, nur der Weg in X-Richtung berücksichtigt, d.h. die Wegbreite und die Reihenzuweisung haben keinen Einfluss auf die Transportdistanz.

Die nachfolgenden Tabellen 7, 8 und 9 beinhalten die simulativ ermittelten durchschnittlichen Transportdistanzen der zu produzierenden Teile sowie die zugehörigen Transportmomente.

**Tabelle 7: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 1 (Dreieckverfahren)**

<b>Anordnung 1 - händisch ermittelt (Dreieckverfahren)</b>			
<b>Produkt</b>	<b>Ø Distanz [m]</b>	<b>Intensität [TE]</b>	<b>Transportmoment [m*TE]</b>
Teil 1	40,45	480,00	19416
Teil 2	37,92	90,00	3413
Teil 3	33,4	144,00	4810
Teil 4	48,3	60,00	2898
Teil 5	44,63	30,00	1339
Teil 6	46,95	60,00	2817
Teil 7	45,42	30,00	1363
Teil 8	44,467	120,00	5336
Teil 9	2,5	1200,00	3000
<b>Σ</b>			<b>44391</b>

Tabelle 8: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 2 (weiterentwickelte Heuristik)

Anordnung 2 – Heuristik (weiterentwickelt)			
Produkt	Ø Distanz [m]	Intensität [TE]	Transportmoment [m*TE]
Teil 1	23,33	480,00	11198
Teil 2	25,97	90,00	2337
Teil 3	51	144,00	7344
Teil 4	40,12	60,00	2407
Teil 5	108,29	30,00	3249
Teil 6	67,63	60,00	4058
Teil 7	107,92	30,00	3238
Teil 8	40,75	120,00	4890
Teil 9	0	1200,00	0
<b>Σ</b>			<b>38721</b>

Tabelle 9: Auswertung Transportdistanz und Transportmoment - Anordnung 3 (DRFLP)

Anordnung 3 - DRFLP			
Produkt	Ø Distanz [m]	Intensität [TE]	Transportmoment [m*TE]
Teil 1	25,05	480,00	12024
Teil 2	23,22	90,00	2090
Teil 3	33,67	144,00	4848
Teil 4	36,15	60,00	2169
Teil 5	65,26	30,00	1958
Teil 6	48,85	60,00	2931
Teil 7	65,26	30,00	1958
Teil 8	36,69	120,00	4403
Teil 9	0	1200,00	0
<b>Σ</b>			<b>32381</b>

Ausgehend vom Transportmoment der Anordnung 1 (Dreieckverfahren) erzielt die mit der weiterentwickelten Heuristik ermittelte Anordnung 2 in diesem

Planungsbeispiel eine Verbesserung des Transportmoments um 12,8% (Reduktion des Transportmoments von 44391 auf 38721).

Durch das DRFLP wird das Optimum dieses Anordnungsproblems exakt bestimmt. Diese optimale Anordnung erzielt eine weitere Verbesserung von 14,3 % (verglichen mit der heuristischen Lösung, Reduktion des Transportmoments von 38721 auf 32381). Insgesamt erreicht das DRFLP eine Reduktion des Transportmoments von 27,1% im Verhältnis zu Layout 1.

Da in den nachfolgenden Planungsschritten i.d.R. weitere Planungsvorgaben einbezogen werden, die zu weiteren Layoutänderungen führen, stellt insbesondere eine optimale Lösung des DRFLP, eine geeignete Planungsbasis dar. Im DRFLP lassen sich weitere Nebenbedingungen einfügen, welche z.B. Strukturierungsvorgaben für die Positionen der Warenein- und -ausgänge bei der Optimierung berücksichtigen. Es ist daher empfehlenswert bis 21 Maschinen das DRFLP Verfahren einzusetzen, da für diese Problemgröße das Optimum exakt berechnet werden kann. Wird darüber hinaus für größere Anordnungsprobleme eine kurze Berechnungszeit gefordert, kann die weiterentwickelte Heuristik eingesetzt werden. Das händische Verfahren wird aufgrund des hohen manuellen Aufwandes und der im Vergleich schwächeren Lösung in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

## **5.2 Einsatz von TOMAS für eine Neuplanung**

Die entwickelte Gesamtmethodik wird nachfolgend für die Neuplanung eines Produktionslayouts eingesetzt. Als Planungsgrundlage dient das zuvor eingeführte Planungsbeispiel der Schneckengetriebefertigung.

### **5.2.1 Anwendung der Gesamtmethodik in der Neuplanung**

In diesem Abschnitt wird die Gesamtmethodik für die Neuplanung schrittweise angewendet. Anhand der drei Hauptphasen wird der Ablauf und die erzielten (Teil-) Ergebnisse erläutert.

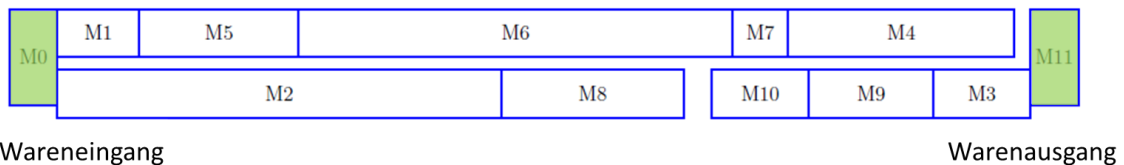
#### **Mathematische Anordnungsoptimierung**

Im ersten Schritt der Gesamtmethodik TOMAS wird das DRFLP gelöst und eine Anordnungsoptimierung mit den statischen Basisdaten ermittelt. Dafür werden die Maschinengrundflächen und deren untereinander vorliegende Transportbeziehungen in Form einer Transportmatrix verwendet. Zusätzlich wird als Strukturvorgabe die Position des Wareneingangs und des Warenausgangs am

Anfang und am Ende des Weges festgelegt, da sie zu einer klareren Strukturierung des Materialflusses und besseren Übersicht des Layouts führt. Die Berücksichtigung dieser Vorgabe bei der Anordnungsoptimierung mittels DRFLP wird durch das Einbinden von Nebenbedingungen in das mathematische Modell erreicht. Durch die direkte Integration in der optimierten Anordnung wird ein hoher Anpassungsaufwand in den nachfolgenden Schritten vermieden.

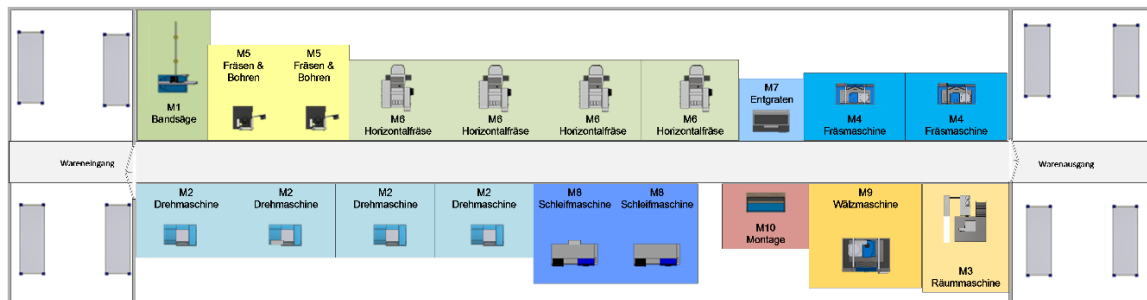
Die nachfolgende **Abbildung 63** zeigt die optimierte DRFLP Anordnung.

**Anordnung des DRFLP mit Strukturvorgaben**



**Abbildung 63: Mathematisch optimierte Anordnung für das Praxisbeispiel (mit Vorgabe der Warenein- und -gänge)**

Zusätzlich zu der abgebildeten Anordnung werden die Positionen der einzelnen Maschinen in Tabellenform ausgegeben. Eine detailliertere Ansicht zeigt **Abbildung 64**.



**Abbildung 64: Detaillierte Darstellung der optimierten Anordnung**

Diese mathematisch optimierte Anordnung wird in den weiteren Schritten simuliert und zu einem realisierungsreifen Layout weiterentwickelt.

### Automatisierte Modellgenerierung

Für den Import in das Basis-Simulationsmodell wurden durch das DRFLP zusätzlich zu der grafischen Anordnung die in **Tabelle 10** dargestellten Werte ausgegeben.

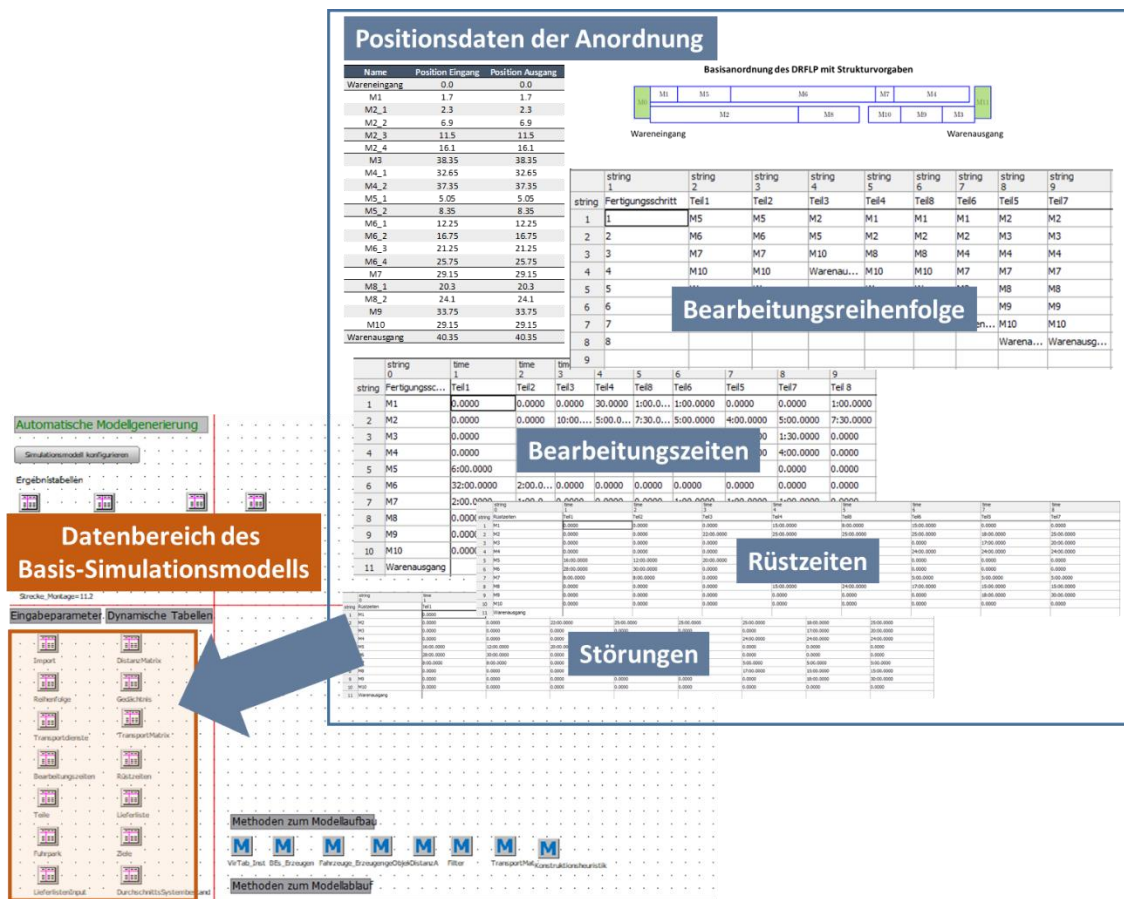


**Tabelle 10: Maschinenpositionen der optimierten Anordnung**

Name	Position
Wareneingang	0.0
M1	1.7
M2_1	2.3
M2_2	6.9
M2_3	11.5
M2_4	16.1
M3	38.35
M4_1	32.65
M4_2	37.35
M5_1	5.05
M5_2	8.35
M6_1	12.25
M6_2	16.75
M6_3	21.25
M6_4	25.75
M7	29.15
M8_1	20.3
M8_2	24.1
M9	33.75
M10	29.15
Warenausgang	40.35

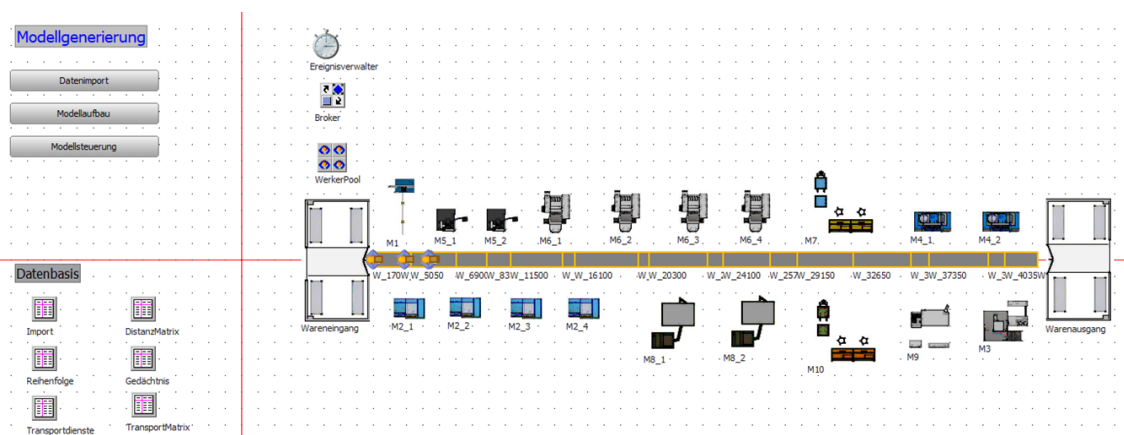
Anhand der tabellarisch aufgeführten Positionen für die Maschinen sowie der Warenein- und -ausgänge kann im Simulationsmodell die Anordnung nachgebildet werden. Die Maschinenpositionen werden, wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben, in das Basis-Simulationsmodell importiert.

Zusätzlich werden die für die Simulation erforderlichen dynamischen Daten in Tabellenform in das Basis-Modell geladen. In den Tabellen werden Bearbeitungsreihenfolgen der einzelnen Teile auf den Maschinen angegeben sowie Bearbeitungs-, Rüst- und Störungszeiten im Datenbereich des Basismodells abgelegt (siehe **Abbildung 65**)



### Abbildung 65: Übertragung der Daten in das Basis-Simulationsmodell

Auf Grundlage der im Basis-Simulationsmodell abgelegten Daten wird das spezifische Simulationsmodell automatisiert generiert. Die automatisiert erzeugten Simulationsbausteine werden anhand der angegebenen Maschinenpositionen Simulationselemente angeordnet (siehe **Abbildung 66**) und es werden alle erforderlichen Steuerungsmethoden verknüpft.



**Abbildung 66: Spezifisches Simulationsmodell der mathematisch optimierten Anordnung**

Mit dem generierten, spezifischen Simulationsmodell liegt nun ein lauffähiges Simulationsmodell vor, das in der nachfolgenden Hauptphase eingesetzt wird.

### **Layoutsimulation**

Mit dem automatisiert erzeugten Simulationsmodell der optimierten Anordnung werden Simulationsläufe durchgeführt. Das Modell arbeitet nach dem Pull-Prinzip. Bei allen Simulationsläufen liegen die gleichen Meldebestände<sup>31</sup> für die einzelnen Produkte vor. Es wird für die Simulation die Verteilstrategie „kürzeste Bearbeitungszeit“ eingesetzt, bei der zunächst alle bereits eingeplanten Aufträge bei mehrfach vorhandenen Maschinen eines Typs überprüft und die entsprechenden Wartezeiten berechnet werden. Anschließend wird das Ziel, das die kürzeste Bearbeitungs- bzw. Wartezeit ermöglicht, ausgewählt (siehe auch Kapitel 4.5.3 und 4.5.4). Diese Verteilstrategie bildet die Aufteilung der Aufträge auf die Maschinen realitätsnah ab. Dabei ergeben sich die in den nachfolgenden Tabellen und Diagrammen zusammengefassten Daten. Die Simulationsergebnisse sind in der folgenden **Tabelle 11** dargestellt.

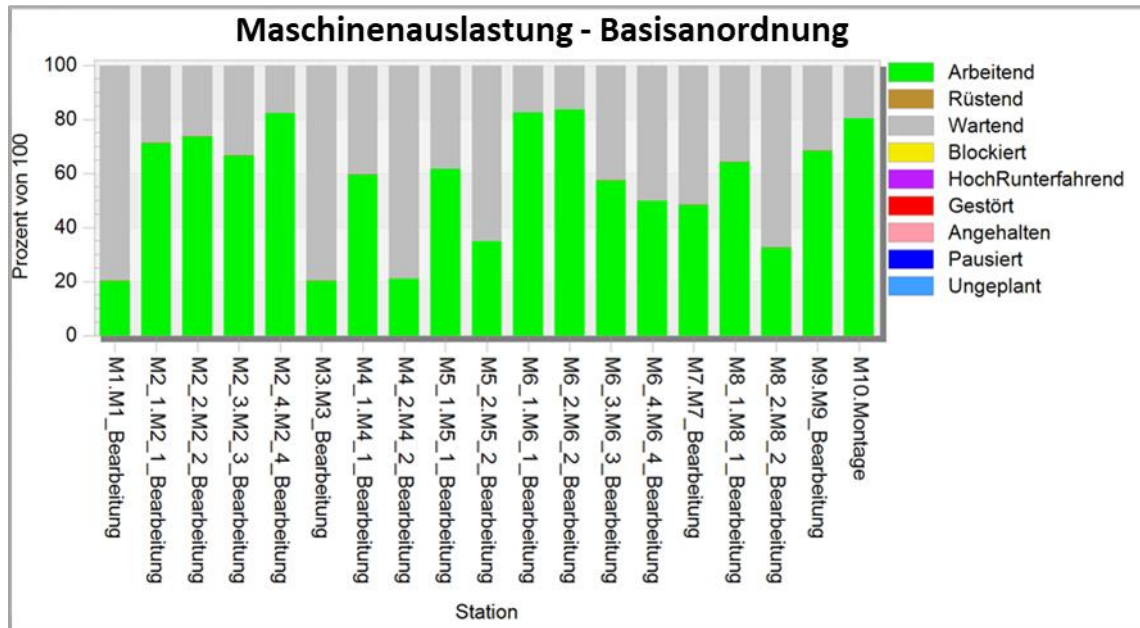
**Tabelle 11: Simulationsergebnisse der mathematisch optimierten Anordnung**

Simulationsergebnisse der mathematisch optimierten Anordnung					
Produkt	Ø Distanz [m]	Intensität [TE]	Transportmoment [m*TE]	Ø Durchlaufzeit [d:h:m:s]	Ø Bestand [TE]
Teil 1	29,14	480,00	13987,2	36:09:12:47	16,28
Teil 2	29,14	90,00	2622,6	37:02:06:50	8,66
Teil 3	36,91	144,00	5315,04	37:21:34:47	10,60
Teil 4	29,14	60,00	1748,4	43:01:11:05	8,58
Teil 5	71,40	30,00	2142	59:10:57:38	9,29
Teil 6	59,71	60,00	3582,6	54:19:57:56	8,52
Teil 7	71,15	30,00	2134,5	75:09:56:14	9,10
Teil 8	29,14	120,00	3496,8	50:20:49:46	9,89
Getriebe	11,20	300,00	3360	nicht erfasst	nicht erfasst
			<b>Σ 38389,14</b>	<b>Ø 46:17:29:36</b>	<b>Σ 80,90</b>

Die Simulationsergebnisse bilden anschließend eine Referenz für die weitere Layoutplanung. Anhand dieser Werte kann verglichen werden, wie sich die

<sup>31</sup> Anhand des Meldebestands eines zu Pproduzierenden Produktes wird in der Simulation erkannt, wann ein neues Produktionslos in Auftrag bzw. in die Produktion gehen kann. Sobald der Meldebestand eines Produktes unterschritten wird, gibt eine Steuerung ein neues Produktionslos frei.

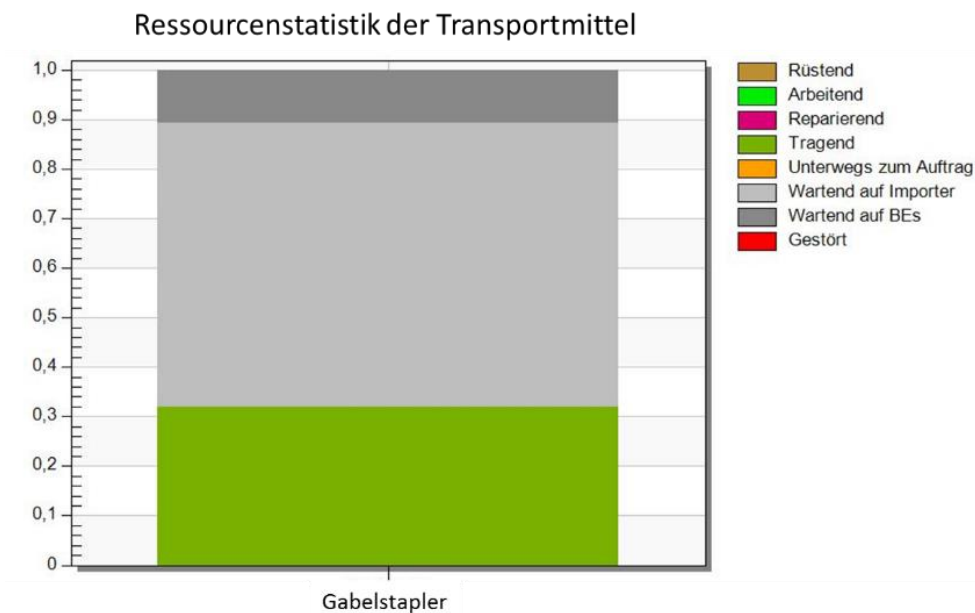
Anpassung der mathematisch optimierten Anordnung an die Rahmenbedingungen und Planungsrestriktionen auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Zusätzlich können die Auslastungen der Maschinen grafisch dargestellt werden, um eine schnelle Überprüfung hinsichtlich der statischen Datenbasis durchzuführen (**Abbildung 67**).



**Abbildung 67: Maschinenauslastung bei Simulation der mathematisch optimierten Anordnung**

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass keine der Maschinen maximal ausgelastet ist und somit auch keinen Engpass darstellt. Durch die dynamische Simulation lässt sich somit die Dimensionierung absichern. Daraus geht auch hervor, dass die mathematisch optimierte Anordnung für die weitere Planung zu verwenden ist.

Mit dem Simulationsmodell wird zusätzlich eine Ressourcenstatistik der Transportmittel erfasst. Für die Simulation wurden zwei Gabelstapler eingesetzt. Die nachfolgende **Abbildung 68** stellt die Simulationsergebnisse der Transportressourcen gemeinsam dar.



**Abbildung 68: Ressourcenstatistik der Transportmittel**

Aus der Ressourcenstatistik lässt sich ermitteln, ob die eingesetzten Transportmittel noch freie Kapazitäten haben oder stark ausgelastet sind, sodass der Einsatz weiterer Transportressourcen zu untersuchen ist. Im Praxisbeispiel sind die zwei eingesetzten Gabelstapler durchschnittlich nur zu ca. 32% ausgelastet (siehe Anteil „Arbeitend“). Für die weiteren Simulationsläufe wird daher diese Anzahl der Transportmittel beibehalten.

Wenn in dieser Planungsphase bereits Kosten für den Einsatz eines Staplers bekannt sind, lässt sich zusätzlich durch die Simulation in Verbindung mit einer Kostenbewertung die effizient einzusetzende Menge an Transportmitteln im Verhältnis zu den Ausbringungsmengen und Durchlaufzeiten ermitteln.

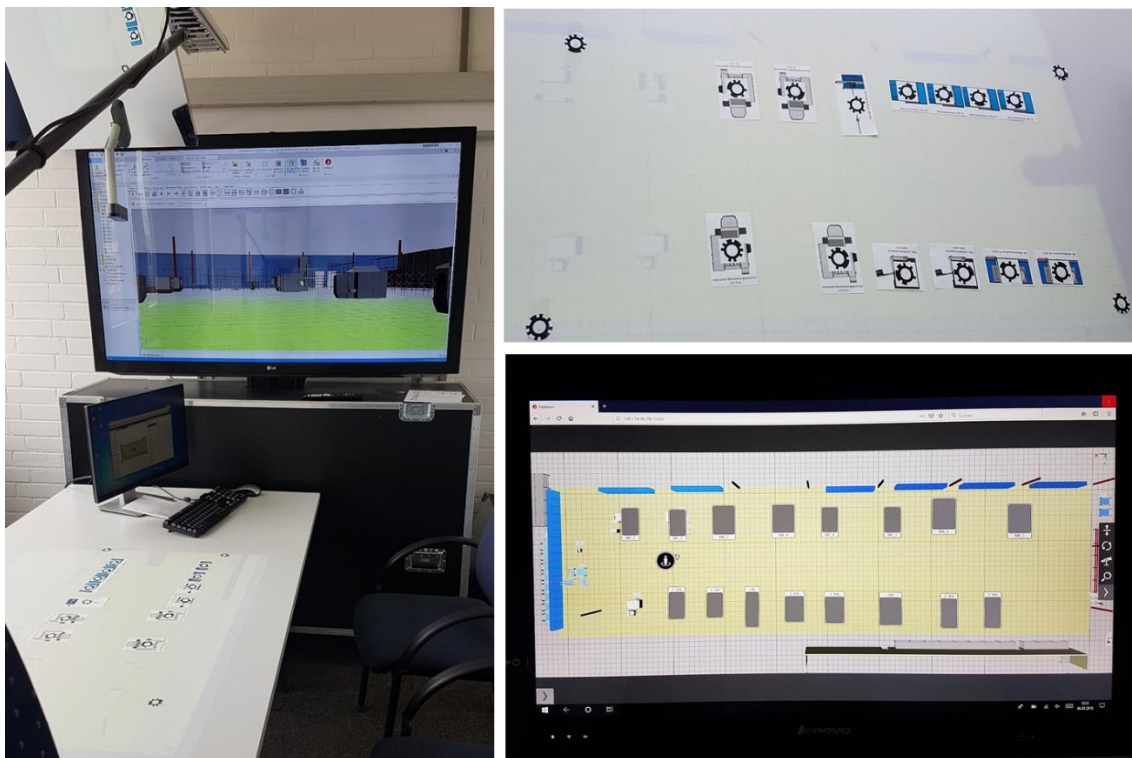
Wenn in diesem Schritt der Layoutsimulation nachgewiesen wird, dass Maschinen an ihrer Kapazitätsgrenze arbeiten und dadurch einen limitierenden Faktor für die gesamte Produktion darstellen, muss eine neue, angepasste Datenbasis für die Anordnungsoptimierung ermittelt werden. In diesem Fall ist die Hauptphase „*mathematische Anordnungsoptimierung*“ erneut zu durchlaufen.

Im nächsten Schritt wird die Anordnung hinsichtlich der Randbedingungen und Planungsrestriktionen optimiert und zu einem Reallayout weiterentwickelt. Als unterstützendes Werkzeug kommt dabei der Planungstisch zum Einsatz. Das Simulationsmodell wird als 3D-Ansicht in Plant Simulation geöffnet und das eddison Plug-in gestartet. Es werden anschließend alle Maschinen, die im Rahmen der Layoutplanung verschiebbar sein sollen, markiert und mit eddison

verknüpft. Für den Einsatz des kamerabasierten Tracking mit Markern zur Verschiebung der Maschinen ist folgende Vorgehensweise erforderlich:

1. Erstellen der Marker mit Maschinengrundrissen
2. Verbindung der Kamera mit eddison
3. Festlegung eines Begrenzungsrahmens für das Tracking
4. Verknüpfen der einzelnen Marker mit den jeweiligen Maschinen

Im Anschluss ist die Anpassung der Maschinenpositionen über das Kameratracking in Plant Simulation möglich. Alternativ kann die Interaktion mit den Maschinen im Modell auch über ein Tablet erfolgen (siehe **Abbildung 69**).



**Abbildung 69: Marker- und Tablet-basierte Interaktionsmöglichkeiten mit dem Modell**

Bei der Tablet-basierten Interaktion mit dem Modell entfällt die Vorbereitung mit dem Erstellen und Verknüpfen der Marker. Eine Verschiebung der Maschinen und die Navigation durch die 3D-Ansicht auf dem Display findet über Touchbefehle statt (siehe Kapitel 4.5.5).

In Teamarbeit wird die mathematisch ermittelte Anordnung am Planungstisch hinsichtlich der Rahmenbedingungen und Planungsrestriktionen optimiert. Zu berücksichtigende Anforderungen bilden hierbei folgende Aspekte:

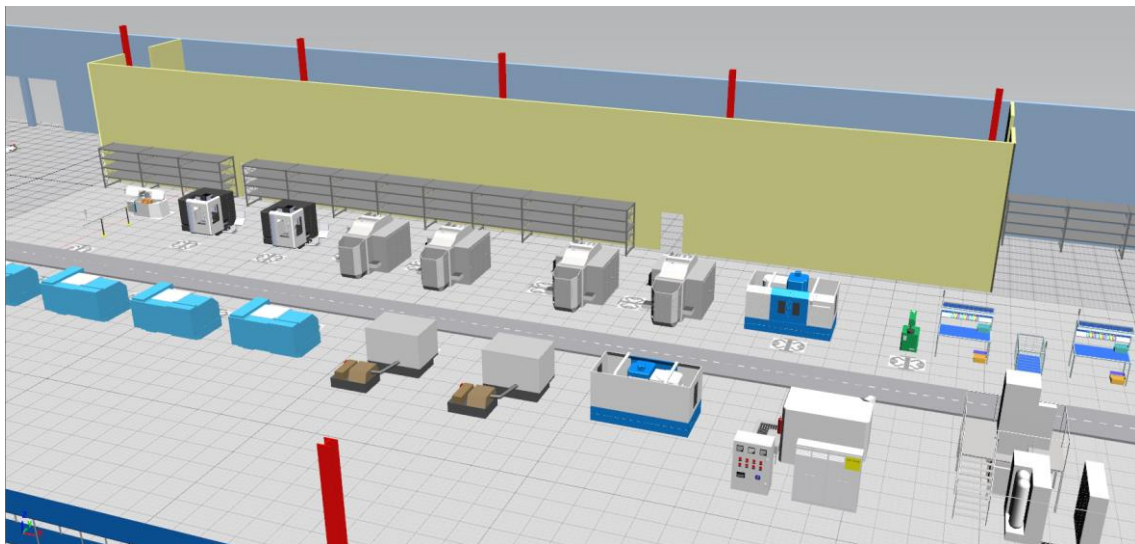
- Vermeidung von Konflikten zwischen Betriebsmitteln, Maschinen oder Arbeitsplätzen (z.B. Trennung von Schwingungsreichen Maschinen und



Messeinrichtungen, Mindestabstand zwischen schmutzbelasteten Arbeitsplätzen und Montage)

- Gemeinsame Verwendung von Infrastruktur (z.B. Medienanschlüsse, Späneförderer)
- Sicherstellung Ver- und Entsorgung (z.B. Abtransport von Spänebehältern)
- Arbeitsschutzmaßnahmen (z.B. Lärmschutzmaßnahmen)

Während der Planung wurde die Ausgangsanordnung weiterentwickelt. Zwischen den vier Horizontalfräsen wurde der Durchgang verbreitert, um das Auswechseln der Spänebehälter zu vereinfachen. Die nachfolgende **Abbildung 70** zeigt das geplante Layout.



**Abbildung 70:** Darstellung des geplanten Layouts

Zusätzlich wurden die Arbeitsplätze für das Entgraten der Zwischenprodukte und für die Endmontage zusammengelegt. Diese sollen bei der Realisierung aus Lärmschutzgründen mit einem Trennwandsystem eingehaust werden. Darüber hinaus dient die Abtrennung der Reinhaltung des Montageplatzes, um Qualitätsmängel durch verschmutzte Bauteile (z.B. durch Späne oder Schleifstaub) zu vermeiden. Aufgrund dieser Maßnahme erhöht sich der Platzbedarf für beide Arbeitsplätze um insgesamt 2 Meter. Der zusätzliche Platzbedarf wird durch die Verschiebung einer Fräsmaschine auf die Position der Montage aus der mathematisch optimierten Anordnung realisiert.

Das Layout wird direkt am Planungstisch simuliert und die Ergebnisse analysiert. Als Referenz werden die Ergebnisse der mathematisch bestimmten Anordnung hinzugezogen.

Aus den Ergebnissen in **Tabelle 12** und **Tabelle 11** (Simulationsergebnisse der mathematischen Anordnung) geht hervor, dass die Umsetzung der Planungsrestriktionen und Randbedingungen und die damit verbundenen Änderungen der Maschinenpositionen zu einer leichten Erhöhung der Transportdistanzen und somit auch des Transportmoments führt. Weiterhin ist ein geringer Anstieg der Durchlaufzeit zu verzeichnen. Der durchschnittliche Bestand der im System befindlichen Produkte bleibt (nahezu) unverändert.

**Tabelle 12 Simulationsergebnisse des geplanten Layouts**

Simulationsergebnisse des Layouts					
Produkt	Ø Distanz [m]	Intensität [TE]	Transportmoment [m*TE]	Ø Durchlaufzeit [d:h:m:s]	Ø Bestand [TE]
Teil 1	34,14	480,00	16387,2	36:17:53:36	17,88
Teil 2	34,14	90,00	3072,6	38:16:47:49	7,21
Teil 3	42,35	144,00	6098,4	37:14:45:36	10,61
Teil 4	34,14	60,00	2048,4	42:23:16:43	8,58
Teil 5	70,36	30,00	2110,8	59:02:06:29	9,27
Teil 6	45,93	60,00	2755,8	55:11:47:57	8,50
Teil 7	67,69	30,00	2030,7	75:14:27:18	9,10
Teil 8	34,14	120,00	4096,8	50:17:01:14	9,89
Getriebe	3,20	300,00	960	nicht erfasst	nicht erfasst
			<b>Σ 39560,7</b>	<b>Ø 46:22:43:23</b>	<b>Σ 81,05</b>

Die Simulationsergebnisse bestätigen die Realisierbarkeit des geplanten Layouts und weisen nur geringe Abweichungen zur mathematisch optimierten Anordnung auf.

Falls in diesem Planungsschritt allgemein durch die Anpassung des Layouts noch Engpässe und ein Erweiterungsbedarf des Maschinenparks identifiziert werden, ist es erforderlich, die mathematische Anordnungsoptimierung zu erweitern. In diesem Fall wird die Hauptphase 1 nochmals mit den erweiterten Grundlagen durchlaufen.

### **Freigabe**

In dieser Hauptphase wird das zuvor ausgeplante und simulativ abgesicherte Layout im VR-Labor dargestellt. Während der virtuellen Begehung werden die räumliche Anordnung hinsichtlich der Kollisionsfreiheit und der Einhaltung von erforderlichen Abständen überprüft. Nach dieser finalen Absicherung erfolgt die Präsentation der Planungsergebnisse (siehe **Abbildung 71**) zur Endabstimmung und der Freigabe zur Realisierung.





**Abbildung 71: Präsentation der Planungsergebnisse im VR-Labor**

Die Navigation durch das Layout wird dabei über ein Tablet gesteuert. Es bestehen dabei dieselben Interaktionsmöglichkeiten wie bei der partizipativen Planung, sodass ggf. notwendige Verschiebungen der Maschinen zur finalen Anpassung ebenfalls möglich sind.

Mit der VR-Großprojektion kann in kurzer Zeit allen Beteiligten ein einheitliches Bild von der Planungslösung vermittelt werden. Die Praxistauglichkeit des Layouts wird durch die Simulationsergebnisse belegt und bietet dadurch eine objektive Grundlage für die Beurteilung durch die Entscheidungsträger.

Mit der Freigabe endet der Planungsprozess und es liegt ein optimiertes, abgesichertes und zur Realisierung freigegebenes Layout vor.

## 5.3 Einsatz von TOMAS für die Planung während der Betriebsphase

Immer kürzere Produktlebenszyklen und die damit verbundenen Wechsel von Produktionsprogrammen führen zur Notwendigkeit, die Layoutstrukturen ständig anzupassen. Mit modularen und mobilen Produktionsressourcen, die sich in unterschiedlichen Zusammenstellungen vernetzen lassen, werden Grundlagen für die schnelle Anpassung und permanente Optimierung der Layouts hinsichtlich der wechselnden Anforderungen geschaffen. Die Gesamtmethodik TOMAS wird im zweiten Teil der praktischen Anwendung für die Layoutplanung während der Betriebsphase eingesetzt und soll insbesondere die schnelle Umplanung für neue Produktionsbedingungen unterstützen. Nachfolgend wird zunächst eine Einführung in das Anwendungsbeispiel gegeben. Darauf aufbauend erfolgt der Einsatz der Gesamtmethodik zur Optimierung der Layouts bei dem geplanten Wechsel von Produktionsprogrammen während der Betriebsphase.

### 5.3.1 Einführung in das Planungsbeispiel

Dem Anwendungsbeispiel für die Umplanung mit der Gesamtmethodik liegt ein Betrieb mit dem Schwerpunkt auf der Lohnmontage und der Produktion elektrischer Antriebe zugrunde. Das Unternehmen stellt daher ständig wechselnde Produkte her. Das Leistungsspektrum umfasst dabei die Vor- und Endmontage von Komponenten und Produkten unter Einsatz verschiedener Bearbeitungs- und Fügeprozesse, wie z.B. Bohren, Lötén, Kleben. Die geplanten Wechsel der Produktionsprogramme erfolgen gemäß den Auftragsprognosen und werden als Planungsgrundlage für die Layoutplanung verwendet.

Es liegen für die Planung drei verschiedene Produkte zur Bearbeitung vor. In der nachfolgenden **Abbildung 72** sind jeweils die Produkte der einzelnen Aufträge dargestellt.

**Auftrag 1:** Pedelec Motor



**Auftrag 2:** E-Antrieb Anlagenbau



**Auftrag 3:** Torantrieb



**Abbildung 72:** Produkte der verschiedenen Aufträge

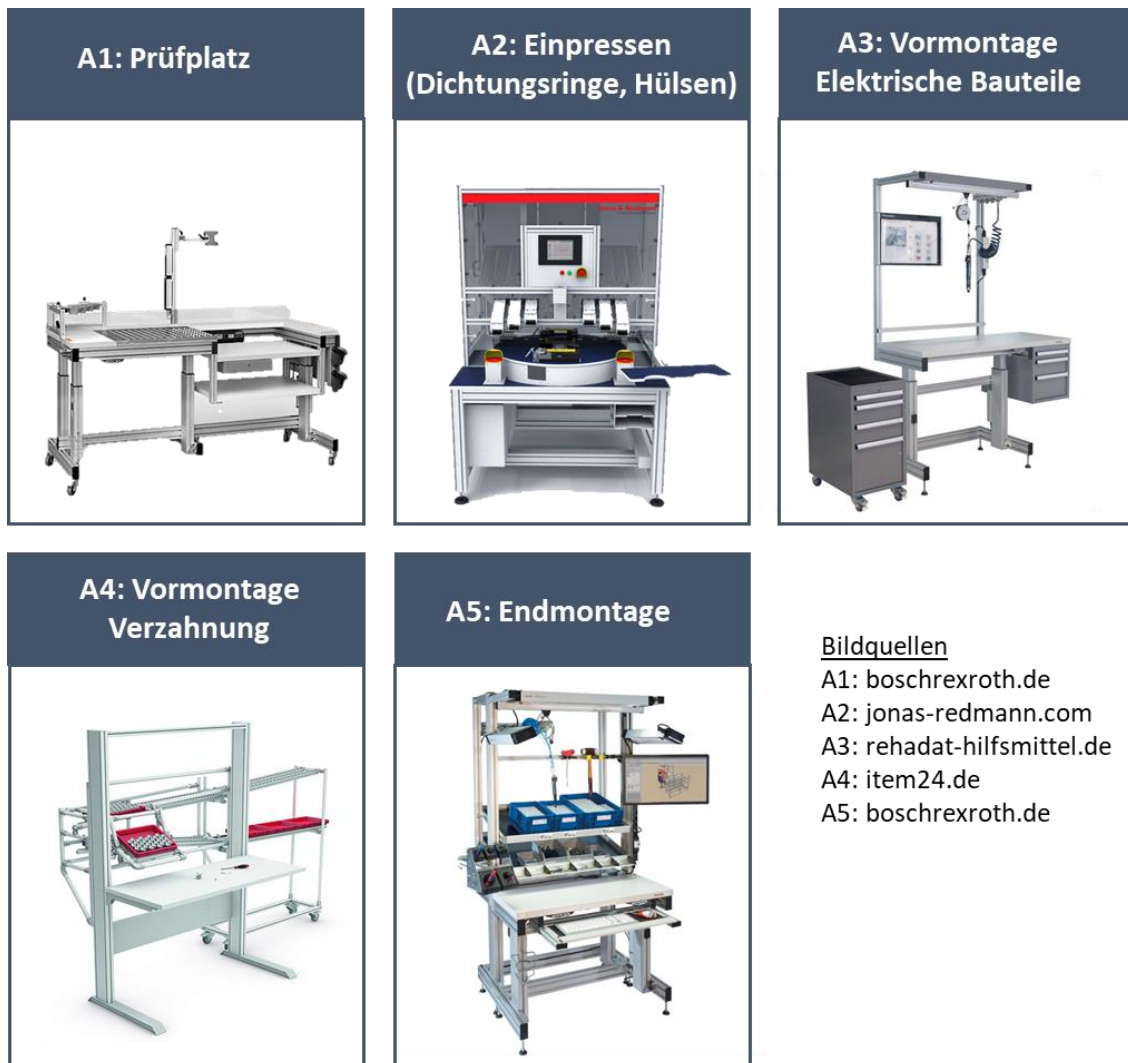
Die Produkte bestehen aus verschiedenen Einzelkomponenten, die folgenden Gruppen zugeordnet werden:

- Gehäuse (Gehäuseteile und Abdeckungen)
- Elektrische Komponenten (z.B. Platinen, Motoren, Schalter)
- Zahnräder und Wellen
- Standard- und Zukaufteile (z.B. Lager, Schrauben)

Die Aufträge beinhalten folgende Stückzahlen:

- Auftrag 1 (Pedelec Motor): 6000 Einheiten
- Auftrag 2 (E-Antrieb Anlagenbau): 3000 Einheiten
- Auftrag 3 (Torantrieb): 5500 Einheiten

Für die Produktion und Montage der elektrischen Antriebe werden verschiedene Arbeitsplätze und Produktionsmodule eingesetzt. Eine Übersicht der zu verwendenden Arbeitsplätze zeigt **Abbildung 73**.



**Abbildung 73: Arbeitsplätze zur Produktion der elektrischen Antriebe**

Die Arbeitsplätze werden zur Durchführung der manuellen Prozesse benötigt. Diese beinhalten das Überprüfen der Teile und Baugruppen, das Einpressen von Hülsen oder Dichtungsringen, die Vormontage von elektronischen Komponenten, die Vormontage von Zahnrädern sowie die Endmontage des Produktes. Zusätzlich sind (teil-) automatisierte Prozesse zu durchlaufen. Dafür werden weitere Produktionsmodule eingesetzt (**Abbildung 74**).



**Abbildung 74: Module zur Produktion der elektrischen Antriebe**

Die dargestellten Produktionsmodule und Arbeitsplätze sowie deren Transportbeziehungen bilden die Grundlage für die Umplanung. Im nachfolgenden Kapitel werden diese für die Planung von Produktionslayouts für das vorliegende Anwendungsbeispiel einbezogen.

### 5.3.2 Anwendung von TOMAS für die Umplanung während des Betriebes

Aufbauend auf dem dargestellten Planungsbeispiel wird die Gesamtmethodik für Umplanungen während des Betriebes durchlaufen. Wie bereits in Kapitel 4.6 dargestellt, wird der Ablauf dafür auf die Hauptphasen „Anordnungsoptimierung“, „automatisierte Modellgenerierung“ sowie „Layoutsimulation und partizipative Planung“ reduziert.

Zu Beginn der Planung müssen die geänderten Rahmenbedingungen, wie in diesem Fall die prognostizierten Produktionsaufträge, als neue Ausgangsbasis für die Anordnungsoptimierung aufbereitet werden. Die Vorbereitung dieser Daten für die Anordnungsoptimierung ist durch qualifizierte Mitarbeiter aus den Bereichen Fabrikplanung oder Produktionsplanung durchzuführen.

Bei der statischen Planung eines Layouts (vgl. Kapitel 2.1) erfolgt i.d.R. die Zusammenfassung aller Aufträge zu einem Gesamtproduktionsprogramm, auf dessen Basis eine Transportmatrix erstellt (siehe **Tabelle 13**) und anschließend ein Layout geplant wird.

**Tabelle 13: Transportmatrix für das Gesamte Produktionsprogramm**

Produktionsprogramm - Gesamt												
von	WE	A1	M1	A2	M2	A3	M3	A4	M4	M5	A5	WA
WE		355	640	0	110	1300	50	0	0	0	0	0
A1	355		410	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	640	410		504	150	96	0	0	150	0	150	0
A2	0	0	504		30	220	0	0	110	45	0	0
M2	110	0	150	30		0	0	120	60	0	0	0
A3	1300	0	96	220	0		930	370	0	0	316	0
M3	50	0	0	0	0	930		980	0	55	0	0
A4	0	0	0	0	60	370	980		170	0	1410	0
M4	0	0	150	110	0	0	0	170		30	460	0
M5	0	0	0	45	0	0	55	0	30		174	0
A5	0	0	150	0	0	316	0	1410	460	174		1920
WA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1920	

Basierend auf dieser Transportmatrix wurde das Layout für das gesamte Produktionsprogramm (im folgenden Layout – PP Gesamt genannt) mit der Gesamtmethodik geplant. Für die weiteren Untersuchungen in diesem Anwendungsbeispiel stellt dieses Layout dann eine Vergleichsbasis dar.

Der Einsatz der Gesamtmethodik während des Betriebes bezieht sich in diesem Anwendungsbeispiel auf die Planung von optimierten Layouts für die effiziente Bearbeitung von wechselnden Produktionsaufträgen. Da die zuvor erläuterten Gegebenheiten der Produktion eine schnelle Anpassung der Layouts auf sich



ändernde Auftragslagen ermöglichen, wird mit TOMAS jeweils eine optimierte Maschinenanordnung geplant und abgesichert sowie mit Layout PP Gesamt verglichen. Anhand dieser Gegenüberstellung soll beurteilt werden, ob die Anpassung des Layouts für einen Auftrag sinnvoll ist. Für die drei zu bearbeitenden Aufträge liegen die in den nachfolgenden Tabellen dargestellten, Transportbeziehungen vor.

**Tabelle 14: Transportmatrix - Auftrag 1**

[illegible]

**Tabelle 15: Transportmatrix - Auftrag 2**

[illegible]

Tabelle 16: Transportmatrix - Auftrag 3

Auftrag 3 - Torantrieb												
von \ zu	WE	A1	M1	A2	M2	A3	M3	A4	M4	M5	A5	WA
WE		55	319	0	110	770	0	0	0	0	0	0
A1	55		110	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	319	110		429	0	0	0	0	0	0	0	0
A2	0	0	429		0	220	0	0	110	0	0	0
M2	110	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
A3	770	0	0	220	0		550	220	0	0	220	0
M3	0	0	0	0	0	550		550	0	55	0	0
A4	0	0	0	0	0	220	550		110	0	770	0
M4	0	0	0	110	0	0	0	110		0	220	0
M5	0	0	0	0	0	0	55	0	0		99	0
A5	0	0	0	0	0	220	0	770	220	99		1100
WA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1100	

Die Transportmatrizen bilden zusammen mit den Grundflächen der Module und Arbeitsplätze die statische Datenbasis für die Anordnungsoptimierung. Da die Anwendung der Gesamtmethodik bereits im ersten Praxisbeispiel vollständig erläutert wurde, erfolgt in diesem Abschnitt keine erneute vollständige Beschreibung. Die Optimierung der Maschinenanordnung erfolgt automatisiert, sodass dieser Schritt während des Planungsprozesses nur durch den Import der bereits aufbereiteten Daten gestartet wird. Im Folgenden werden die erzeugten Layouts vorgestellt. **Abbildung 75** zeigt das für das gesamte Produktionsprogramm optimierte Layout.

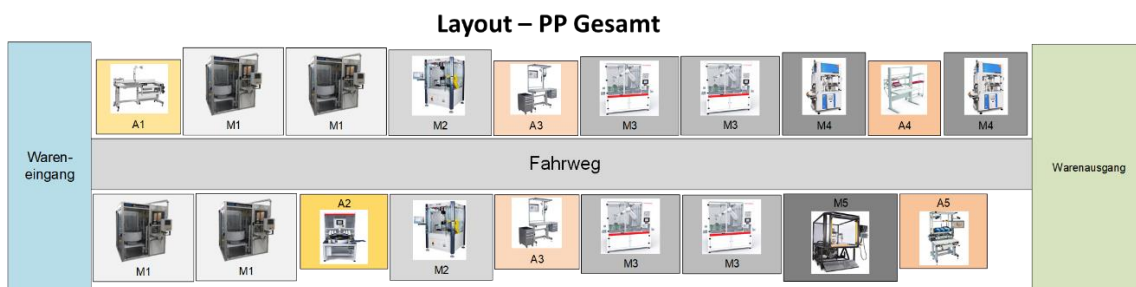
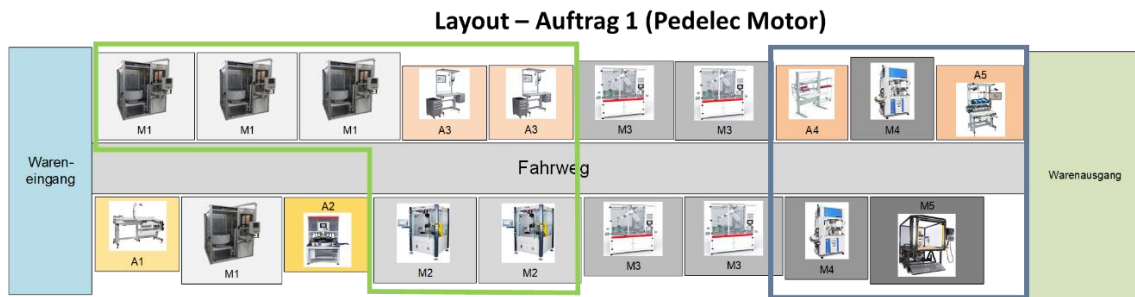


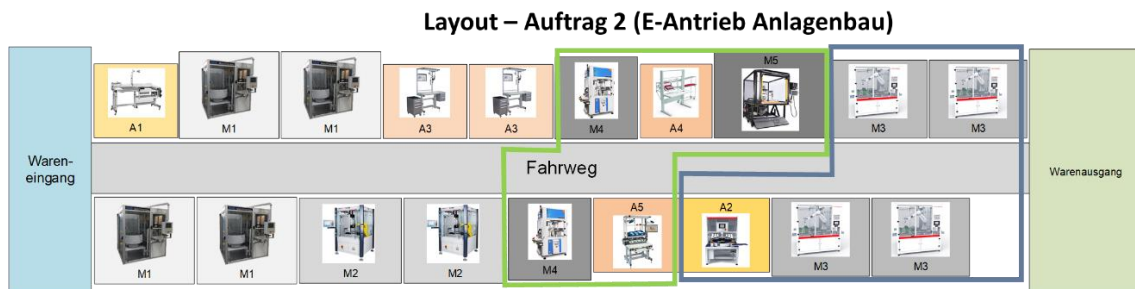
Abbildung 75: Layout - PP Gesamt

Die für die einzelnen Aufträge optimierten Layouts werden in den Abbildungen veranschaulicht und anschließend kurz auf die Unterschiede zum Layout „PP Gesamt“ erläutert.



**Abbildung 76: Optimiertes Layout für die Bearbeitung von Auftrag 1**

Das für den Auftrag 1 optimierte Layout unterscheidet sich von der Planung für das gesamte Produktionsprogramm in den grün und blau markierten Bereichen. Aufgrund der Transportbeziehungen werden die Module zum Bohren und Gewindeschneiden sowie die Schleifautomaten und die Arbeitsplätze zur Vormontage der elektrischen Bauteile stärker gruppiert (siehe grüne Markierung). Im Bereich vor dem Warenausgang werden die Lötautomaten näher zur Mitte verlagert.



**Abbildung 77: Optimiertes Layout für die Bearbeitung von Auftrag 2**

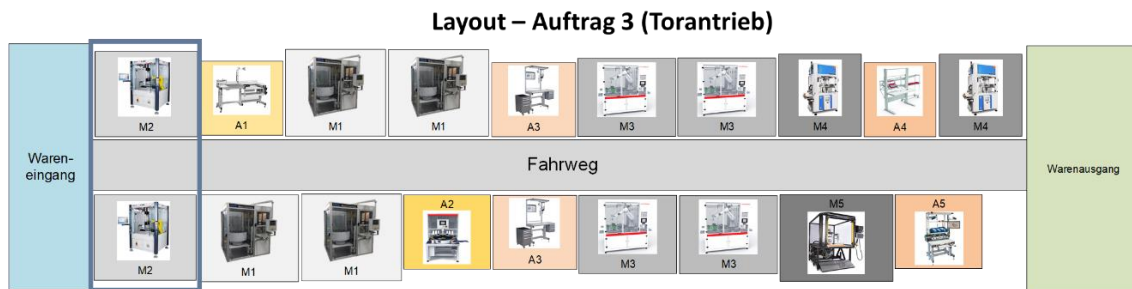
Für die Bearbeitung des zweiten Auftrages ergeben sich bei der Layoutplanung folgende Abweichungen vom Layout „PP Gesamt“:

- Die Lötautomaten und der Roboter zum Auftrag der Dichtmasse werden zusammen mit Arbeitsplatz „Vormontage Verzahnung“ und „Endmontage“ in die Mitte verlagert (grün hervorgehoben).
- Der Arbeitsplatz zum Einpressen von Führungshülsen und Dichtungsringen sowie die Module zum Bohren und Gewindeschneiden werden in Richtung des Warenausgangs verschoben (blaue Markierung).
- Die Schleifautomaten und Arbeitsplätze zur Vormontage der elektrischen Bauteile werden jeweils nebeneinander gruppiert.

Der dritte Auftrag hat durch die verhältnismäßig hohen Transportintensitäten (im Vergleich mit Auftrag 1 und 2), die zwischen den Modulen und Arbeitsplätzen vorliegen, einen großen Einfluss auf die Transportmatrix für das gesamte



Produktionsprogramm. **Abbildung 78** stellt das Layout für die Bearbeitung von Auftrag 3 dar.



**Abbildung 78: Optimiertes Layout für die Bearbeitung von Auftrag 3**

Erwartungsgemäß ergaben sich bei der Planung des Layouts, aufgrund der zuvor genannten Einflüsse auf die Transportmatrix, nur geringfügige Abweichungen zum Layout „PP Gesamt“. Die Schleifautomaten wurden in Richtung des Wareneingangs verschoben. Darüber hinaus sind die Layouts identisch.

Die erzeugten Layouts werden, wie bei der Neuplanung dargestellt, in das Basis-Simulationsmodell importiert und automatisiert das lauffähige Simulationsmodell generiert. Dieser Schritt und der Start der Simulationsläufe kann beispielsweise ebenfalls durch einen qualifizierten Mitarbeiter aus der Fabrik- oder Produktionsplanung durchgeführt werden. Alternativ könnte diese Aufgabe einem Betriebsingenieur übertragen werden, der ein entsprechendes Systemverständnis aufbringt und an der Planung beteiligt ist.

Während der Layoutsimulation wurden pro Auftrag Simulationsläufe mit dem jeweils neu geplanten Layout sowie mit dem Layout „PP Gesamt“ durchgeführt. Anhand der Simulationsergebnisse wurden die Auswirkungen auf folgende Werte ermittelt:

- Gesamtbearbeitungszeit des Auftrages
- Durchlaufzeiten der Lose
- Transportdistanzen
- Transportmoment
- Durchschnittlicher Bestand

Die nachfolgenden **Tabellen 17, 18 und 19** stellen die Gesamtbearbeitungszeit der jeweiligen Aufträge in Verbindung mit den verwendeten Layouts gegenüber.

Tabelle 17: Gesamtbearbeitungszeiten Auftrag 1

Auftrag und Layout	Bearbeitungszeit in h	Bearbeitungszeit [dd:hh:mm:ss]
Auftrag 1 - Layout Optimiert	1142,3	47:14:18:52
Auftrag 1 - Layout PP-Gesamt	1226,0	51:01:59:54

Durch den Wechsel von Layout „PP-Gesamt“ auf das für den Auftrag 1 neu geplante Layout kann eine Reduktion der Gesamtbearbeitungszeit um ca. 7 % erreicht werden. Insgesamt kann der Auftrag ca. 3,5 Tage schneller bearbeitet werden. Neben der geringeren Bearbeitungszeit ergeben sich auch geringere Durchlaufzeiten (siehe **Abbildung 79**).

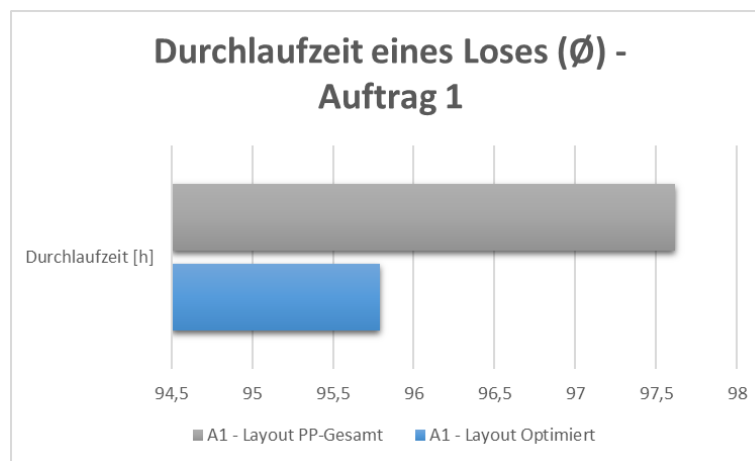


Abbildung 79: Diagramm der durchschnittlichen Durchlaufzeiten eines – Auftrag 1

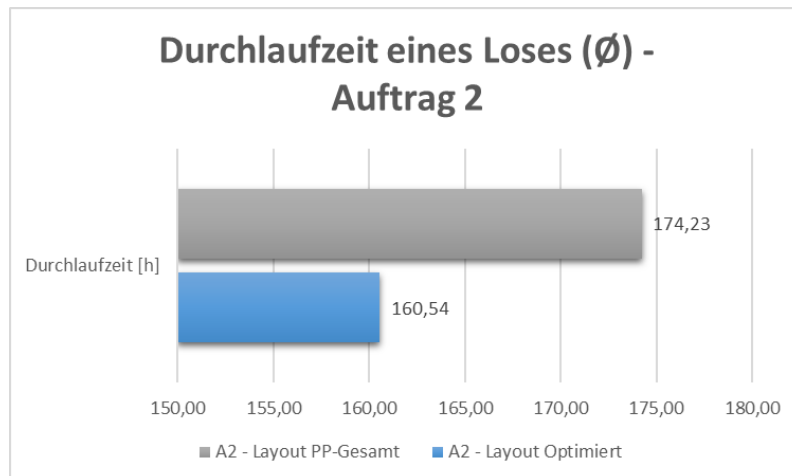
Die durchschnittliche Durchlaufzeit eines Produktionsloses kann aufgrund der besseren Verkettung der Fertigungsschritte im Layout A1 – Optimiert gegenüber dem Layout „PP Gesamt“ um 1,8 Stunden verringert werden. Dies entspricht einer Verbesserung von 1,9 %. Zudem reduziert sich auch das Transportmoment. Der durchschnittliche Systembestand bleibt bei der Simulation beider Layouts auf gleichem Niveau. Eine Umstellung des Layouts für den Auftrag 1 bietet daher ein gutes Verbesserungspotential.

Bei der Simulation der Layouts für Auftrag 2 ergaben sich folgende Gesamtbearbeitungszeiten (**Tabelle 18**):

Tabelle 18: Gesamtbearbeitungszeiten Auftrag 2

Auftrag und Layout	Bearbeitungszeit in h	Bearbeitungszeit [dd:hh:mm:ss]
Auftrag 2 - Layout Optimiert	981,3	40:21:16:34
Auftrag 2 - Layout PP-Gesamt	1079,0	44:23:02:12

Auch für den zweiten Auftrag zeigen die Simulationsergebnisse des neu geplanten Layouts eine Verringerung der Gesamtbearbeitungszeit um 4,1 Tage. Dadurch kann der Auftrag in einer 9% kürzeren Zeit abgeschlossen werden. Die durchschnittliche Durchlaufzeit wurde durch die Layoutanpassung ebenfalls gesenkt, wie in der nachfolgenden **Abbildung 80** dargestellt.



**Abbildung 80: Diagramm der durchschnittlichen Durchlaufzeiten eines Loses – Auftrag 2**

Wie auch bei Auftrag 1 führt die bessere Verkettung der Bearbeitungsschritte durch das optimierte Layout zu einer Reduktion der Durchlaufzeit. Diese konnte um durchschnittlich 13,7 Stunden bzw. 7,9 % verbessert werden. Das Transportmoment verringerte sich um 4,5 %. Die Bestände sind ebenfalls auf einem gleichbleibenden Niveau (12677 vs. 12595 Einheiten). Aus den Simulationsergebnissen lässt sich daher schließen, dass die Anpassung des Layouts für den zweiten Auftrag ebenfalls sinnvoll ist.

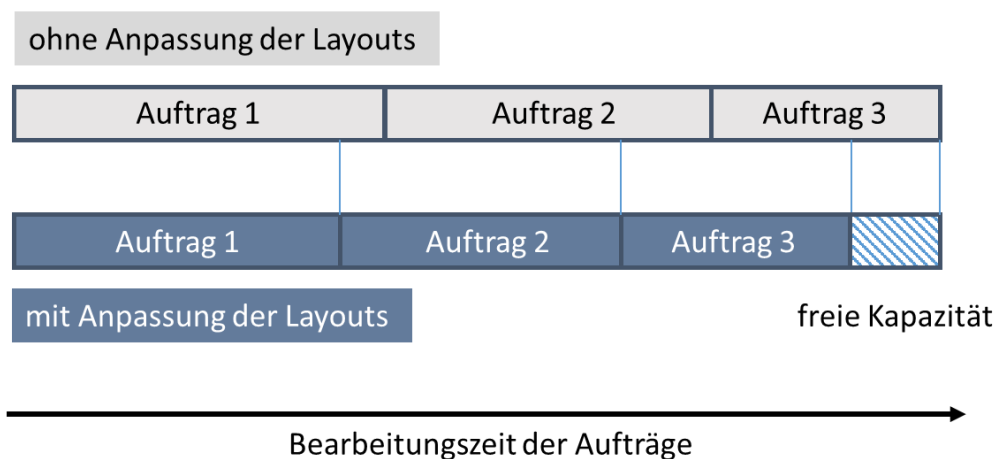
Für den dritten Auftrag ergaben sich, wie zur erwähnt, nur minimale Abweichungen zwischen dem neu geplanten Layout und „PP Gesamt“. Hinsichtlich der Bearbeitungszeit, der Durchlaufzeit, des Bestandes und des Transportmoments kamen in der Simulation keine bzw. nur sehr geringe Abweichungen zu Stande. Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse aus den Simulationsläufen.

Tabelle 19: Übersicht der Simulationsergebnisse für die Aufträge und Layouts

Auftrag und Layout	Bearbeitungszeit [dd:hh:mm:ss]	durchschnittl. Durchlaufzeit [dd:hh:mm:ss]	Bestand	Transportmoment
Auftrag 1 - Layout Optimiert	47:14:18:52	3:23:47:30.4058	7071	12226
Auftrag 1 - Layout PP-Gesamt	51:01:59:54	4:01:37:06.1962	7102	12447
Auftrag 2 - Layout Optimiert	40:21:16:34	6:16:32:26,2797	12677	7792,75
Auftrag 2 - Layout PP-Gesamt	44:23:02:12	7:06:13:42.2591	12595	8158,05
Auftrag 3 - Layout Optimiert	33:09:02:37	1:04:17:42.4192	2438	25620,21
Auftrag 3 - Layout PP-Gesamt	33:09:04:44	1:04:34:16,1549	3226	25620,21

Bei Auftrag 3 ergeben sich aufgrund der sehr geringen Veränderung des Layouts im Vergleich zu „PP Gesamt“ keine Vorteile durch eine Umstellung.

Werden bei der Gesamtbearbeitungszeit für alle drei Aufträge die Ergebnisse für die Anpassungen mit dem unveränderten Layout gegenübergestellt, ergibt sich der in **Abbildung 81** dargestellte Zusammenhang.



**Abbildung 81:** Gegenüberstellung der Bearbeitungszeit bei Anpassung der Layouts und ohne Anpassung

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Anpassungen der Layouts für Auftrag 1 und Auftrag 2 insgesamt zu einer Verkürzung der Bearbeitungszeit um 7,6 Tage führen. Damit wird die Zeit, in der alle drei Aufträge bearbeitet werden können um 6,8% reduziert. Gleichzeitig werden Kapazitäten für die Annahme weiterer Aufträge frei.

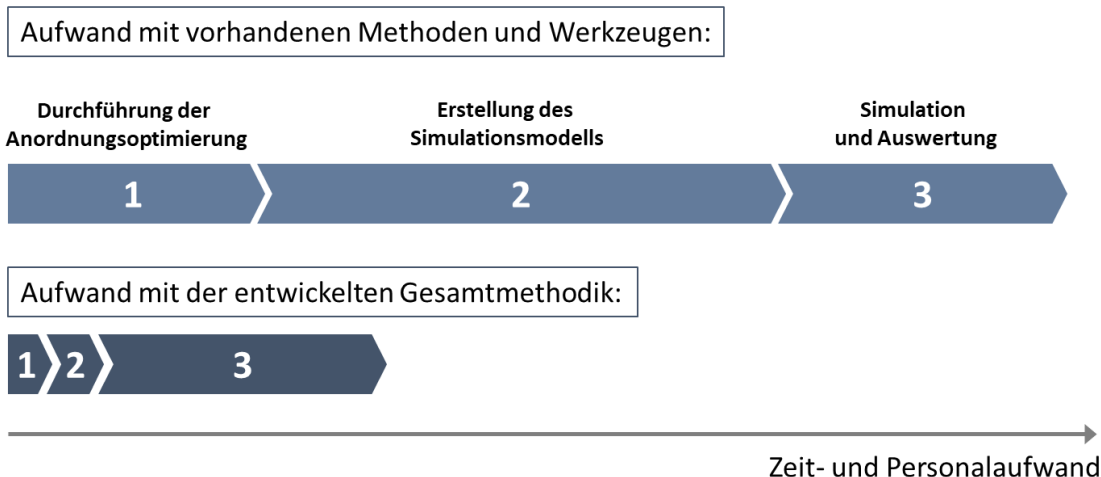
Die Interpretation der Simulationsergebnisse zur Bewertung der Layouts ist, wie auch in den vorigen Schritten, durch einen qualifizierten Fabrik- bzw. Produktionsplaner oder Betriebsingenieure durchzuführen. Die Simulationsergebnisse werden automatisch am Ende eines Simulationslaufes in

einer übersichtlichen Darstellung aufbereitet. Dadurch wird der Aufwand zur Einordnung der Ergebnisse durch den Mitarbeiter verringert.

Anschließend gilt es zu überprüfen, ob bei der Layoutplanung alle Planungsrestriktionen berücksichtigt wurden oder ob weiterer Anpassungsbedarf besteht, der beispielsweise durch die Komplexität des Planungsproblems nicht vollständig bei der Anordnungsoptimierung berücksichtigt wurde. Im Anwendungsbeispiel mit den mobilen und modularen Ressourcen, die in einer vernetzungsfähigen Halle angeordnet werden, lassen sich alle Anforderungen bei der Anordnungsoptimierung berücksichtigen. Daher wird das Abbruchkriterium erreicht und die Planungszeit verringert. Falls weiterer Anpassungsbedarf des Layouts ermittelt wird, erfolgt die partizipative Planung, in der die betroffenen Mitarbeiter aus den Produktionsbereichen einzubinden sind.

Durch den Einsatz der Gesamtmethodik für die Planung während der Betriebsphase kann überprüft werden, ob für die aktuellen Rahmenbedingungen und Auftragslagen eine Optimierung des Layouts sinnvoll ist. Für die Änderung des Layouts während der Betriebsphase muss der Aufwand für die Umstellung mit der Zeitersparnis z.B. kostenbasiert gegenübergestellt werden.

Aufgrund der automatisierten Prozesse bei der Berechnung der mathematisch optimierten Anordnung und der Simulationsmodellgenerierung lassen sich der Aufwand und die Planungszeit reduzieren. In der nachfolgenden **Abbildung 82** ist der Zeit- und Personalaufwand bei dem Einsatz bisheriger Methoden und Werkzeuge qualitativ mit den kombinierten und automatisierten Elementen der entwickelten Gesamtmethodik gegenübergestellt.



**Abbildung 82: Qualitative Darstellung der Verringerung des Zeit- und Personalaufwands bei der Planung mit TOMAS**

---

Der Aufwand für die Durchführung der Anordnungsoptimierung und die Erstellung des Simulationsmodells wurde durch die Automatisierung dieser Schritte signifikant reduziert. Die Anwender müssen lediglich die erforderlichen statischen und dynamischen Daten im Basis-Simulationsmodell hinterlegen. Für die regelmäßige Umplanung während der Betriebsphase erscheint es sinnvoll, eine feste Mitarbeiterstelle bzw. eine neue Position für die Durchführung und Koordination der Planung zu schaffen. Diese muss eine Schnittstelle zwischen Fabrik- und Produktionsplanung darstellen. Je nach Planungshäufigkeit und Planungshorizont, kann diese stärker der Produktionsplanung oder der Fabrikplanung zugeordnet werden. Dementsprechend ist ein qualifizierter Mitarbeiter einzusetzen, der das erforderliche Systemverständnis für den von der Planung betroffenen Bereich aufweist. Eine weitere Aufgabe neben der Durchführung und Koordination der Planung ist dabei auch die Einbindung der entsprechenden Mitarbeiter aus den Produktionsbereichen.

Bei einer häufigen Verwendung von TOMAS für die Layoutplanung und -simulation wird der Zeitvorteil durch die Verwendung einer mathematisch optimierten Anordnung und der automatisierten Modellgenerierung noch deutlicher.

## 6 Kritische Reflexion und Ausblick

Die entwickelte Gesamtmethodik dient der Planung, Absicherung und Unterstützung der Freigabe von Produktionslayouts. Um den Planungsprozess zu vereinfachen und beschleunigen, wurde die Anordnungsoptimierung mit der Materialflusssimulation und weiteren Werkzeugen der Digitalen Fabrik verknüpft. Die in Kapitel 4.1 abgeleiteten Anforderungen und Zielsetzungen wurden in der Gesamtmethodik umgesetzt.

Allgemein müssen Planungsaufgaben immer häufiger bzw. kontinuierlich bearbeitet werden. Mit der Gesamtmethodik wird sowohl die Neuplanung als auch die Anpassung von Layouts auf veränderte Gegebenheiten während der Betriebsphase unterstützt.

Um die Qualität der Planung zu erhöhen, werden die Layouts nicht nur mit einer statischen Datenbasis, sondern auch dynamisch geplant. Dies wird durch die Kopplung von Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation ermöglicht.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die eingesetzten mathematischen Verfahren, das entwickelte Simulationsmodell sowie die Verbindung mit partizipativen Werkzeugen und VR im Rahmen der Gesamtmethodik kritisch reflektiert und jeweils ein Ausblick zu weiteren Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

### 6.1 Mathematische Anordnungsoptimierung

Mittels der Lösungsmethoden des DRFLP oder der verbesserten Heuristik wird (auf der statischen Datengrundlage) in der Gesamtmethodik eine optimierte Anordnung der Planungsobjekte erzeugt. In Kapitel 5.1.2 wurde die Lösungsqualität der beiden eingesetzten Verfahren anhand eines Anwendungsbeispiels verglichen und deren Leistungsfähigkeit nachgewiesen. Die verwendete Heuristik wurde zuvor, hinsichtlich der Einbeziehung realer Transportabstände während der Berechnung, erweitert. Im Vergleich zu dem häufig in der Fabrikplanung eingesetzten Dreiecksverfahren nach Schmigalla konnte eine deutliche Verbesserung des Transportmomentes (im Anwendungsbeispiel 12,8%) erzielt werden. Damit erzeugt die Heuristik optimierte Lösungen für die Anordnung als Planungsbasis mit einem geringen Rechenaufwand.

Dennoch bieten die Lösungsverfahren des DRFLP neben der exakten Berechnung eines Optimums weitere Vorteile. Es können zusätzliche Nebenbedingen eingefügt

werden, die z.B. Vorgaben an die Grundstruktur des zu entwickelnden Layouts berücksichtigen. Im Anwendungsbeispiel wurden für die mathematisch ermittelte Anordnung die Positionen der Warenein- und -ausgänge vorgegeben und bei der Optimierung einbezogen. In den nachfolgenden Schritten kann dadurch der Planungsaufwand bei der Entwicklung eines Layouts aus der mathematisch optimierten Anordnung verringert werden. Die gewählten mathematischen Anordnungsverfahren bilden daher eine wichtige Planungsbasis, die mit geringem Aufwand erzeugt werden kann.

Für die Gesamtmethodik werden in dieser Arbeit mathematische Anordnungsverfahren mit einer hohen Lösungsqualität verwendet. Anhand dieser Verfahren wurde grundsätzlich beschrieben, wie sich eine Kombination mit der Simulation im Rahmen einer Gesamtmethodik realisieren lässt. Anhand der Anwendungsbeispiele wurde deren Nutzen dargestellt. Die betrachteten Anordnungsverfahren sind auf einfache Wegestrukturen beschränkt. Für größere Planungsprobleme sind jedoch auch komplexere Wegestrukturen zu berücksichtigen, die z.B. Kreuzungen oder mehrere Wege in verschiedenen Reihen aufweisen. In diesem Fall ist ein größerer Aufwand bei der Anpassung der mathematisch optimierten Anordnung auf die erforderliche Wegestruktur nötig.

Aus den vorliegenden Einschränkungen des Betrachtungsrahmens resultiert weiterer Entwicklungsbedarf, um auch für größere Praxisanwendungen gute Anordnungen zu ermitteln. Insbesondere die weiterentwickelte Heuristik ist für mehrreihige Wegestrukturen zu überarbeiten. Hierfür müssen neue Berechnungsvorschriften entwickelt und im Simulator implementiert werden. Bei den exakten mathematischen Anordnungsverfahren existieren bereits Lösungsansätze für diese komplexen Optimierungsprobleme wie z.B. des Multi-Row-Facility-Layout-Problems. Weiterer Forschungsbedarf resultiert ebenfalls für den gezielten Einsatz der Anordnungsverfahren im Rahmen der Umplanung. Einen Untersuchungsaspekt können dabei beispielsweise die Kosten für die Umpositionierung von Maschinen bei der Anpassung des Layouts bilden, die dabei ebenfalls in der mathematischen Anordnungsoptimierung mit aufgegriffen werden.

## 6.2 Simulation und Partizipation

Die automatisierte Modellgenerierung anhand der optimierten Anordnung und den dynamischen Daten stellt für die Gesamtmethodik ein wichtiges Kernelement dar. Durch den automatisierten Prozess der Simulationsmodellerstellung werden die



Hemmnisse bei dem Einsatz von Simulationen im Planungsprozess stark reduziert und ein deutlicher Zeitvorteil geschaffen. Nachdem die Anordnung und die dynamischen Daten in das entwickelte Basis-Modell geladen wurden, steht direkt ein spezifisches, lauffähiges Simulationsmodell zur Verfügung. Der Anwender wird dabei mit einer einfachen Bedienoberfläche unterstützt. Die im Modell enthaltenen Analysefunktionen ermöglichen dabei die objektive Bewertung der Layouts.

Trotz der automatisierten Modellerstellung und der vereinfachten Bedienung des Simulationsmodells ist weiterhin Erfahrung der Anwender bei der Interpretation der Simulationsergebnisse erforderlich. Daher sind für diese Aufgabe vorrangig qualifizierte Mitarbeiter aus den Fachbereichen Fabrik- oder Produktionsplanung einzusetzen. Alternativ kann die Interpretation auch durch mit dem System vertraute Betriebsingenieure vorgenommen werden.

Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse, die während des Planungsprozesses erzielt werden, ist abhängig von den zugrundeliegenden Eingangsdaten. Hierzu zählt sowohl die statische als auch die dynamische Datenbasis. Diese wirken sich auf die Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Basislösung und die statistische Auswertung der Simulationsläufe aus. Daher ist vor Beginn der Planung zunächst die Qualität der Datenbasis abzusichern. Im Sinne einer kontinuierlichen Planung ist die Bereitstellung von aktuellen Daten für die Layoutsimulation daher ein wichtiger Faktor. Hier wäre ein direkter Austausch des Simulators mit den Datenbanken für die Betriebsdaten denkbar. Ein durchgängiges Datenmanagement ist eine wichtige Voraussetzung, um während der Betriebsphase effizient Layouts, unter Berücksichtigung wachsender Datenmengen, planen zu können.

Für den Einsatz der Gesamtmethodik während des Betriebes ist es sinnvoll diese Datenbasis kontinuierlich zu aktualisieren. Die dabei gesammelten Daten helfen die Genauigkeit zu verbessern und ermöglichen jederzeit realistische Simulationsergebnisse bei der Layoutplanung zu erhalten. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Verbindung mit Datenbanken, in denen die statische und dynamische Datenbasis verwaltet werden.

Die Verwendung von partizipativen Planungswerkzeugen und VR im Planungsprozess hilft, die Akzeptanz und Abstimmung der Planungsergebnisse zu verbessern. Anhand der Simulationsergebnisse kann zusätzlich die Leistungsfähigkeit des geplanten Systems nachgewiesen werden. Allerdings ist die Verfügbarkeit von VR-Werkzeugen wie Caves, Powerwalls oder Brillen nicht immer gegeben. Trotz der unterstützenden Planungswerkzeuge ist jedoch auch

weiterhin Expertenwissen erforderlich, um die Ergebnisse zu interpretieren und einzuordnen.

Während der Betriebsphase unterstützt TOMAS durch die Layoutsimulation, das durch die Anpassung von Layouts entstehende Potential für die Produktion zu bewerten. Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich beurteilen, wann eine Änderung des Layouts sinnvoll ist. Für den besseren Vergleich der Simulationsergebnisse und der Layoutvarianten bietet sich beispielsweise weiterer Entwicklungsbedarf bei der zentralen Speicherung der Simulationsergebnisse sowie einer automatisierten Ausgabe einer Handlungsempfehlung. In diesem Rahmen könnte der Anwender zusätzlich durch eine geeignete Visualisierung der erfassten Statistikwerte für den Vergleich von Varianten unterstützt werden.

Der Zeitvorteil, der durch die automatisierte Modellgenerierung und die Erstellung einer optimierten Anordnung erreicht wird, ist hierbei ein entscheidender Faktor. Dieser verstärkt sich, je häufiger Planungen mit TOMAS durchgeführt werden.

### **6.3 Abschließende Betrachtung**

Produktionsanlagen werden zunehmend flexibler, um trotz der dynamischen Veränderungen des Marktes und der sinkenden Losgrößen eine effiziente Produktion zu erreichen. Eine zunehmende Modularisierung der Betriebsmittel nach dem Plug and Produce Prinzip ermöglicht eine schnelle Anpassung des Layouts. Um dieses Anpassungspotential nutzen zu können, müssen die Layouts in kurzer Zeit geplant und abgesichert werden.

Aus dem zweiten Anwendungsbeispiel wird deutlich, dass die Gesamtmethodik den Anforderungen einer regelmäßigen Planung von Layouts zur Berücksichtigung von sich ändernden Rahmenbedingungen gerecht wird. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, neben der Verfügbarkeit der erforderlichen Daten, die Akzeptanz der Anwender für die Nutzung der in der Gesamtmethodik enthaltenen Verfahren und Werkzeuge. Wesentliche Kriterien dafür sind die Anwenderfreundlichkeit, Schnelligkeit sowie die Ergebnisqualität. Diese gilt es auch unter Berücksichtigung von Verbesserungsvorschlägen aus der betrieblichen Praxis stetig weiterzuentwickeln. Dabei ist darauf zu achten, dass für die Nutzung keine bzw. nur geringe Eingewöhnungs- und Schulungsphasen erforderlich sind, da sonst negative Auswirkungen auf die Akzeptanz auftreten können.

Bislang wurden die während der Planung generierten Simulationsmodelle für die Absicherung und Bewertung der Layouts verwendet. Eine vertiefende Nutzung der Simulationsmodelle ist jedoch auch für weitere Problemstellungen denkbar.

Beispielsweise könnten die Simulationsmodelle erweitert und für die Optimierung von Losgrößen oder Beständen eingesetzt werden. Um auch diese Untersuchungen und Optimierungen mit dem Simulationsmodell einfach und vollständig zu unterstützen, ist eine Erweiterung des entwickelten Basis-Modells erforderlich. Insbesondere in Verbindung mit der Integration von Anordnungsverfahren für komplexere Wegestrukturen ist auf die erforderliche Universalität des Basis-Modells zu achten. Je nach Komplexität der Erweiterungen ist ggf. auch eine Ausweitung des Konzeptes für die automatisierte Modellgenerierung erforderlich.

Der Einsatz der Gesamtmethodik für die Planung von optimierten Layouts für wechselnde Auftragslagen ermöglicht die Ermittlung und Beurteilung von Verbesserungspotentialen durch die Umstellung auf ein neues Layout. Die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge, mit ihren jeweils optimierten Layouts, wirkt sich dabei auch auf den Aufwand für den Wechsel eines Layouts aus. Ähnliche Aufträge könnten so nacheinander eingeplant werden, dass nur geringe Änderungen an den Layouts erforderlich sind. Um sowohl die Layouts als auch den Änderungsaufwand durch eine sinnvolle Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen zu optimieren, besteht weiterer Forschungsbedarf für eine Koordination von der Produktionsprogramm- und der Layoutplanung.

Für den Einsatz der Gesamtmethodik zur regelmäßigen Umplanung für die Betriebsphase müssen für jedes Unternehmen spezifisch die organisatorischen Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten im Planungsprozess geklärt werden. Eine Eingliederung von TOMAS in die betrieblichen Abläufe hängt von verschiedenen Faktoren ab und lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nicht allgemeingültig definieren. Ein Einflussfaktor für diese Fragestellung ist die Betriebsgröße und die damit verbundene Abteilungs- und Mitarbeiterstruktur. Es gilt individuell zu klären, welche Planungshäufigkeit und welcher Planungshorizont vorliegen, um eine Festlegung der ausführenden Positionen für die Gesamtmethodik vorzunehmen. Gerade für sehr häufig auszuführende Umplanung z.B. aufgrund schnell wechselnder Produktionsprogramme und Auftragslagen kann es sinnvoll sein, eine neue Position einzuführen, welche die Koordination und Durchführung der Planung übernimmt. Sie bildet Schnittstelle zwischen Produktionsplanung, Auftragsdisposition und Fabrikplanung. Im Sinne einer kontinuierlichen Planung ist es ggf. sinnvoll, diesen Mitarbeiter als Planungsbeauftragten einzusetzen, der regelmäßig den Anpassungsbedarf des Layouts hinsichtlich der Rahmenbedingungen und des Produktionsprogramms überprüft, die ersten Planungsschritte ausführt und die Mitarbeiter aus den Produktionsbereichen effizient im Rahmen einer Planungssitzung einbindet. Hier ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, wie diese Prozesse noch stärker

---

softwaregestützt durchgeführt werden können. Ein wichtiger Untersuchungsaspekt liegt dabei auf der automatisierten Identifikation des Wandlungsbedarfs bestehender Layoutstrukturen hinsichtlich neuer Randbedingungen.

Neue innovative Planungsansätze, wie die Fabrikplanung 5.0 nach Bracht et al. (2019), fokussieren erstmals eine vollständig virtuelle Planung von Layouts in einem integrierten VR-Gesamtsystem (Bracht et al. 2019, S. 208). In diesem Gesamtsystem ist u.a. ein virtueller Planungstisch und eine bidirektionale Kopplung von Materialflusssimulation mit VR eingebunden (Bracht et al. 2019, S. 209–211), wodurch eine durchgängige Synchronisation der 3D- und Simulationsmodelle im Planungsprozess erreicht wird. Die hochwertige 3D-Visualisierung von Layouts in einer virtuellen Umgebung (mittels VR-Brillen oder VR-Laboren) verschmilzt somit immer stärker mit der Simulation. Für die entwickelte Gesamtmethodik ergibt sich hinsichtlich dieser Entwicklungsrichtung weiterer Forschungsbedarf, um Layoutplanungen mit leistungsfähigen mathematischen Anordnungsverfahren und des entwickelten Simulationsmodells zukünftig in einem Gesamtsystem vollständig virtuell durchzuführen zu können.

## 7 Zusammenfassung

Immer kürzere Produkt- und Technologielebenszyklen, sinkende Losgrößen sowie ein turbulentes Wettbewerbsumfeld führen zu steigenden Anforderungen an produzierende Unternehmen. Deren Wettbewerbsfähigkeit wird vor allem durch eine effiziente Produktion ermöglicht. Die Grundlage dafür wird bereits mit der Planung und Auswahl von Produktionslayouts geschaffen.

Aufgrund der hohen Volatilität des Marktes und der kurzen Produktlebenszyklen wird die Fabrikplanung daher verstärkt zu einer kontinuierlichen Aufgabe. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, den Planungsprozess effizient zu gestalten. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Gesamtmethodik für die Produktionslayoutplanung, welche diese neuen Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Hinsichtlich dieser Zielsetzung wurden zunächst wissenschaftliche Grundlagen dargestellt. Hierbei wurden zwei Grundelemente identifiziert, die für den Layoutplanungsprozess hinsichtlich den genannten Rahmenbedingungen ein großes Potential aufweisen. Das erste Element bildet die mathematische Anordnungsoptimierung, wodurch eine Basis für die Layoutplanung mit einer hohen Ergebnisqualität ermittelt wird. Aufgrund der hohen Komplexität der Planungsaufgaben sind diese nicht mehr mit statischen Methoden alleine zu bewältigen. Das zweite Grundelement für die Entwicklung der Gesamtmethodik stellt die Materialflusssimulation dar, durch die eine dynamische Abbildung und Planung von Produktionslayouts ermöglicht werden.

Aufbauend auf den wissenschaftlichen Grundlagen wurde der Stand der Forschung und Praxis untersucht. Die vorgestellten Planungsansätze und -verfahren wurden anhand der aktuellen Anforderungen analysiert und bewertet. Aus diesen Ergebnissen wurde der Forschungsbedarf abgeleitet. Anschließend erfolgte eine Ermittlung der während der Entwicklung einer Gesamtmethodik zu berücksichtigenden Anforderungen.

Bei der Umsetzung wurde die Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung und Materialflusssimulation zugrunde gelegt und zusätzlich wurden Werkzeuge der Digitalen Fabrik, wie der Planungstisch oder das VR-Labor, eingebunden. Das Resultat bildet die Gesamtmethodik zur TransportOptimierten Materialflussorientierten AnordnungsSimulation - TOMAS.

In dieser Gesamtmethodik wird zunächst eine Anordnung durch die mathematischen Verfahren zur Anordnungsoptimierung bestimmt. Um eine effiziente Kombination der Anordnungsoptimierung mit der

Materialflusssimulation zu erreichen, wurde ein Konzept für eine automatisierte Modellgenerierung auf Basis statischer und dynamischer Planungsdaten entwickelt und umgesetzt. Dadurch lässt sich der Aufwand für die Erstellung von Simulationsmodellen stark reduzieren und eine deutliche Zeitersparnis erreichen. Darauf aufbauend werden Layouts am Planungstisch weiter geplant und durch die Simulationsergebnisse abgesichert. Da im Sinne einer kontinuierlichen Planung Layouts immer häufiger in kurzer Zeit geplant und abgestimmt werden müssen, ist es erforderlich auch den Freigabeprozess zu unterstützen. In der Gesamtmethodik erfolgt daher der Einsatz von VR zur Präsentation und Endabstimmung der Planungsergebnisse für die finale Freigabe.

In Kapitel 5 wurde TOMAS für die Neuplanung sowie für die Planung während der Betriebsphase anhand zweier Anwendungsbeispiele eingesetzt. Dabei konnte auch der Mehrwert für eine kontinuierliche Planung aufgezeigt werden. Die Gesamtmethodik erfüllt die eingangs definierten Anforderungen und ermöglicht es, eine simulativ abgesicherte Planung von Produktionslayouts innerhalb kurzer Zeit durchzuführen. Die eingesetzten mathematischen Verfahren der Anordnungsoptimierung erzeugen deutlich bessere Lösungen als die üblicherweise verwendeten Anordnungsverfahren. Dadurch wird eine wesentlich bessere Planungsbasis geschaffen. Die frühe Berücksichtigung von Planungsrestriktionen bei der Anordnungsoptimierung führt zu qualitativ besseren Lösungen und verringert den Planungsaufwand und den damit verbundenen Zeitbedarf.

Die Kombination mit der Materialflusssimulation in Verbindung mit der automatisierten Modellgenerierung reduziert den Aufwand für den Simulationseinsatz auf ein Minimum. Dadurch werden die Hemmnisse für den Einsatz der sonst aufwändigen Simulation der Layouts überwunden. Gleichzeitig entfällt der (Zeit-) Aufwand für die Modellerstellung und Validierung, was sich in gleichem Maße auf die Planungsdauer auswirkt. Durch den durchgängigen Softwareeinsatz wird kein Vor- und Nachbereitungsaufwand oder Konvertierungsvorgang benötigt.

Die Gesamtmethodik ermöglicht neben einer besseren Planungsbasis und einen schnellen Simulationseinsatz, eine quantitative Bewertung der Layouts anhand der dynamisch ermittelten Simulationsergebnisse. Dadurch wird in der Neuplanung und insbesondere für die Umplanung der Vergleich von Varianten vereinfacht. Mit der Gesamtmethodik kann daher eine schnelle Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, die besonders im Rahmen einer Neuplanung oder einer regelmäßigen Umplanung für den Vergleich von Layoutvarianten erforderlich ist.

## 8 Literaturverzeichnis

- Aggteleky, Béla (1987): Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. 2., durchges. Aufl. der Neuausg. 3 Bände. München: Hanser (1).
- Aleisa, Esra E.; Lin, Li (2005): For effective facilities planning: Layout optimization then simulation, or vice versa? In: M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong und J. A. Joines (Hg.): Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Orlando, S. 1381–1385.
- Allgayer, Franz (1999): Computerunterstützte Planung von Materialflußsystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1999. München: Utz (Fördertechnik, Materialfluß, Logistik).
- Altinkilinc, Mert (2004): Simulation-Based Layout Planning of a Production Plant. In: Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Washington Hilton and Towers, Washington, D.C., U.S.A., December 5-8, 2004. New York, N.Y, Piscataway, N.J: Association for Computing Machinery, S. 1079–1084.
- Amaral, André R. S. (2013): Optimal solutions for the double row layout problem. In: *Optim Lett* 7 (2), S. 407–413.
- Anjos, M. F.; Fischer, A.; Hungerländer, P. (2018): Improved exact approaches for row layout problems with departments of equal length. In: *European Journal of Operational Research* 270 (2), S. 514–529.
- Apel, Markus; Arping, Tim; Bagcivan, Nazlim; Bambach, Markus; Baranowski, Thomas; Bäuml, Stephan et al.: Virtuelle Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer (Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer (Hg.: Christian Brecher)).
- Armour, G. C.; Buffa, E. S. (1963): A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities. In: *Management Science* (9), S. 294–300.

- 
- Arnhold, Dennis (2013): Digitale Produktionsprozessplanung variantenreicher Produkte unter Berücksichtigung von intervallbasierten Eingangsdaten. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, 29, Hg.: Uwe Bracht).
- Arnold, Dieter (1998): Materialflußlehre. 2., verbesserte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Studium Technik).
- Arnold, Dieter; Furmans, Kai (2009): Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (Hg.) (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- ASSTEC Assembly Technology GmbH & Co. KG (2018): Touchtableboard. ASSTEC. Online verfügbar unter <https://asstec.net/fileadmin/microsites/planungstisch/index.html>, zuletzt geprüft am 03.09.2018.
- Azadivar, Farhad; Wang, John (2010): Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. In: *International Journal of Production Research* 38 (17), S. 4369–4383.
- Bachem, Achim; Jünger, Michael; Schrader, Rainer (1995): Mathematik in der Praxis. Fallstudien aus Industrie, Wirtschaft, Naturwissenschaften und Medizin. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Backer, Philippe De; Kopecki, Lukas (2013): Wettbewerbsvorteil Simulation. Ein produktlebenszyklenorientiertes Konzept. In: Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque und Alexander Klaas (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik 2013. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. 15. ASIM Fachtagung. Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013. Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik; Gesellschaft für Informatik; ASIM-Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik". Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn (ASIM-Mitteilung, 147), 177-186.



- 
- Balci, Osman (1998): Verification, Validation, and Testing. In: Jerry Banks (Hg.): Handbook of Simulation. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, S. 335–393.
- Becker, Jörg: Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung und ihre Einbettung in ein Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationsmodelle. Online verfügbar unter <https://www.wi-inf.uni-duisburg-essen.de/MobisPortal/pages/rundbrief/pdf/Beck98.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- Becker, Jörg; Rosemann, Michael; Schütte, Reinhard (1995): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: *Wirtschaftsinformatik* 5 (37), S. 435–445.
- Beller, Marcel (2009): Entwicklung eines prozessorientierten Vorgehensmodells zur Fabrikplanung. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2010. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Fabrikorganisation).
- Bergmann, Sören (2013): Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau.
- Bethke, Michael (2005): Einsatz der Simulation zur kontinuierlichen Verbesserung eines unterstützenden Prozesses im Rahmen der Aggregatefertigung eines Automobilherstellers. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2004. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, 12, Hg.: Uwe Bracht).
- Bhushan, Navneet; Rai, Kanwal (2004): Strategic decision making. Applying the analytic hierarchy process. London, New York: Springer (Decision engineering).
- Bierschenk, Sabine; Kuhlmann, Timm; Ritter, Arno (2005): Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen. Auswertung einer Breitenbefragung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- Bogatzki, Arnd (1998): Fabrikplanung. Verfahren zur Optimierung der Maschinenaufstellung. Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 1998. Regensburg: Roderer (Theorie und Forschung, 534).

- Bölte, Andreas (1994): Modelle und Verfahren zur innerbetrieblichen Standortplanung. Heidelberg: Physica-Verlag HD (Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft, 48).
- Bracht, U.; Friedrich, G.; Schmidt, D. (1992): Dynamische Fabrikplanung. Teil 1: Systemplanung mit CAD und Simulation. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 1992 (6), 298-303.
- Bracht, Uwe; Dahlbeck, Mirko; Fischer, Anja; Krüger, Thomas (2018a): Combining Simulation and Optimization for Extended Double Row Facility Layout Problems in Factory Planning. In: Marcus Baum, Gunther Brenner, Jens Grabowski, Thomas Hanschke, Stefan Hartmann und Anita Schöbel (Hg.): Simulation science. First International Workshop, SimScience 2017, Göttingen, Germany, April 27-28, 2017, Revised selected papers. Cham, Switzerland: Springer (Communications in computer and information science, 889), S. 39–59.
- Bracht, Uwe; Eckert, Clemens (2008): Digitale Fabrik – Ein Vorgehensmodell für Virtual Reality in der Fabrik- und Anlagenplanung (Digital Factory – A Proceeding Model for Virtual Reality in Site and Plant Design). In: *it - Information Technology* 50 (3).
- Bracht, Uwe; Fahlbusch, Martin (2001): Fabrikplanung mit Virtual Reality. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (1-2), S. 20–26.
- Bracht, Uwe; Fischer, Anja; Krüger, Thomas (2017): Mathematische Anordnungsoptimierung und Simulation. Ein kombinierter Ansatz zur Fabriklayoutplanung. In: *wt - Werkstattstechnik online* 107 (4), S. 200–206
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2011): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Berlin, New York: Springer (VDI-Buch)
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2018b): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele - Basis für Industrie 4.0. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Bracht, Uwe; Gorke, Nils; Spies, Jan (2015): Vernetzung eines virtuellen Projektraums mit dem Fabrik-DMU der Fabrikstrukturplanung. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (10), S. 639–642.

- Bracht, Uwe; Masurat, Thomas (2005): Quo Vadis Ablaufsimulation? Die Bedeutung der Ablaufsimulation im Konzept der Digitalen Fabrik. In: Frank Hülsemann (Hg.): 18. Symposium on System Simulation. Sept. 12 - 15, 2005, Erlangen, Germany. Erlangen: SCS Publ. House (ASIM-Fortschritte in der Simulationstechnik), S. 361–369.
- Bracht, Uwe; Reichert, Johannes (2010): Digitale Fabrik - auch KMU sind aufgefordert künftig ihre Fabriken in 3D-CAD zu planen. Ein Vorschlag zur modularen Auswahl und Einführung geeigneter Komponenten. In: *Industrie Management* 26 (2), S. 65–68.
- Bracht, Uwe; Schlange, Christian; Eckert, Clemens; Masurat, Tom (2005): Datenmanagement für die Digitale Fabrik. Forschungsorientierter Modellansatz für ein effektives Datenmanagement im heterogenen Planungsumfeld. In: *wt - Werkstattstechnik online* 95 (4), S. 197–204.
- Bracht, Uwe; Schlegel, Marc (2018): AR- und VR-Brillen in der Fabrikplanung. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (4), S. 251–256.
- Bracht, Uwe; Schlegel, Marc; Özkul, Felix (2019): Fabrikplanung 5.0. Komplette virtuell zum Ziel. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (4), S. 208–212.
- Briano, Enrico; Caballini, Claudia; Mosca, Roberto; Revetria, Roberto (2010): Using WITNESS Simulation Software as a validation tool for an industrial plant layout. In: Hamido Fujita und G. Guizzi (Hg.): Proceedings of the WSEAS international conferences. Athen: WSEAS Press, S. 201–206.
- Brosch, Patrick (2014): Smarte digitale Layoutplanung. Neue virtuelle und mobile Ansätze für Umplanungen. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, 32, Hg.: Uwe Bracht).
- Cassandras, Christos G.; Lafortune, Stéphane (2008): Introduction to discrete event systems. 2nd ed. New York: Springer.
- Clegg Industries: Portable CNC Machine Shop. Online verfügbar unter <http://www.cleggind.com/projects/specialty-structures/other/project->

details/portable-cnc-machine-shop---mobile-parts-hospital, zuletzt geprüft am 26.01.2019.

Dickmann, Philipp (Hg.) (2007): Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch), zuletzt geprüft am 03.08.2017.

Dombrowski, U.; Ernst, S. (2013): Scenario-based Simulation Approach for Layout Planning. In: *Procedia CIRP* 12, S. 354–359. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.061.

Dombrowski, U.; Quack, S.; Tiedemann, H. (2005): Tuning und Anpassung bestehender Fabriken. Vorhandene Potentiale nutzen. In: *wt Werkstattstechnik online* 95 (5), S. 391–395.

Dombrowski, Uwe (Hg.) (2015): Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Dombrowski, Uwe (2017): IFU Planungstisch 4.0. In: Thomas Bauernhansl und Uwe Dombrowski (Hg.): Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung. Braunschweig: Eine Broschüre des Fachbeirats Deutscher Fachkongress Fabrikplanung, S. 22–23.

Dombrowski, Uwe; Ernst, Stefan; Riechel, Christoph (2011): Effiziente Integration von Mitarbeitern in den Fabrikplanungsprozess. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (10), S. 696–700.

Dombrowski, Uwe; Riechel, Christoph (2010): Entwicklung eines Multitouch-Planungstischs zur Unterstützung der partizipativen Layoutplanung. In: *ZWF - ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (12), S. 1091–1095.

Dombrowski, Uwe; Schulze, Sven; Mielke, Tim (2012): Lebenszyklusorientierung im Industriebau, ZI Jahrbuch 2012. Gütersloh: Bauverlag BV.

Dombrowski, Uwe; Stefanak, Tobias; Krenkel, Philipp (2017): Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. In: Gunther Reinhart

- (Hg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, S. 169–190.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin (2015): Einführung in Operations Research. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin (2006): Heuristische Verfahren. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena. Online verfügbar unter <http://www2.wiwi.uni-jena.de/Papers/wp-sw0806.pdf>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Drexl, Andreas; Domschke, Wolfgang (1996): Logistik. Standorte. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften).
- Drira, Amine; Pierreval, Henri; Hajri-Gabouj, Sonia (2007): Facility layout problems: A survey. In: *Annual Reviews in Control* 31 (2), S. 255–267.
- edddison (2017): edddison for Plant Simulation. Online verfügbar unter <https://www.edddison.com/products/edddison-plant-simulation/>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Edis, Rahime Sancar; Kahraman, Bayram; Araz, Özlem Uzun; Özfirat, M. Kemal (2011): Mathematical and Computational Applications. In: *Mathematical and Computational Applications* 16 (1), S. 97–104.
- Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Eneyo, Emmanuel S.; Pannirselvam, Gertrude P. (1998): The Use of Simulation in Facility Layout Design. A Practical Consulting Experience. In: Proceedings of the 1998 Winter simulation Conference. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, S. 1527–1532.
- Eversheim, Walter; Schuh, Günther (1999): Produktion und Management 3. Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin, Heidelberg: Springer (Hütte).

- Feldmann, Klaus; Reinhart, Gunther (2000): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Fischer, A.; Fischer, F.; Hungerländer, P. (2015): New Exact Approaches to Row Layout Problems. In: *Mathematical Programming Computation* 84 (1), S. 1587–1600.
- Fischer, A.; Krüger, T.; Bracht, U.; Dahlbeck, M. (2017): Combining Simulation and Optimization for Extended Double Row Facility Layout Problems in Factory Planning. International Workshop on Simulation Science. SWZ. Göttingen, 28.04.2017.
- Förster, Alfred; Wirth, Siegfried; Gäse, Thomas (2001): Integrative modulare Produktionssystemplanung. Ein neuer methodischer Ansatz der rechnergestützten Planung. In: *wt Werkstattstechnik* 91 (4), S. 221–228, zuletzt geprüft am 26.10.2017.
- Friebe, Tanja; Schneider, Marcel; Gausemeier, Jürgen; Trächtler, Ansgar (2015): Virtuelle Inbetriebnahme mit wählbarer Modellierungstiefe. Verkürzung der Entwicklungszeit bis zum Start-of-Production. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (4), S. 227–232, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Gaubinger, Kurt; Werani, Thomas; Rabl, Michael (2009): Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement. Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.
- Gleißner, Werner; Wolfrum, Marco (2019): Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation. Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (essentials). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24274-9>.
- Grundig, Claus-Gerold (2015): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser.
- Gudehus, T. (2004): Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer (Engineering online library).

- Günther, Uwe (2005): Methodik zur Struktur und Layoutplanung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005. Chemnitz: IBF (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 50).
- Hawer, Sven; Ilmer, Philipp; Reinhart, Gunther (2015): Klassifizierung unscharfer Planungsdaten in der Fabrikplanung. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (6), S. 348–351.
- Heiserich, Otto-Ernst; Helbig, Klaus; Ullmann, Werner (2011): Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Hernández, Roberto Morales (2003): Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, 149).
- Hildebrand, Torsten (2005): Theoretische Grundlagen der bausteinbasierten, technischen Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen nach dem PLUG+PRODUCE Prinzip. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 45).
- Hompel, Michael ten; Schmidt, Thorsten; Nagel, Lars (2007): Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Intralogistik).
- Hungerländer, Philipp (2013): Single-row equidistant facility layout as a special case of single-row facility layout. In: *International Journal of Production Research* 52 (5), S. 1257–1268.
- Hungerländer, Philipp (2014a): A Semidefinite Optimization Approach to the Parallel Row Ordering Problem. Alpen-Adria Universität Klagenfurt. Optimization-online.

- Hungerländer, Philipp (2014b): Semidefinite Optimization Approaches to Applications in Facility Layout an Logistics. Klagenfurt: Alpen-Adria-Universität.
- Hungerländer, Philipp; Anjos, Miguel F. (2012): A Semidefinite Optimization Approach to Space-Free Multi-Row Facility Layout. In: *Les Cahiers du GERAD*.
- Hungerländer, Philipp; Rendl, Franz (2012): A computational study and survey of methods for the single-row facility layout problem. In: *Computational Optimization and Applications* 55 (1), S. 1–20.
- Jeng, Muder; Xie, Xiaolan (2005): Discrete event system techniques for CIM. Guest editorial. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 18 (2-3), S. 97–99.
- Kerkenberg, Thorben (2014): Innovative und effiziente Fabrikplanung. In: *ZWF* 109 (6), S. 435–438.
- Kerkenberg, Thorben (2016): Digitale Fabrikplanung für zukunftssichere und Industrie 4.0-fähige Produktionssysteme. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (3), S. 104–108.
- Kettner, Hans; Schmidt, Jürgen; Greim, Hans-Robert (2010): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Mit zahlreichen Checklisten. Unveränd. Nachdr. der Ausg. 1984. München: Hanser.
- Klar, Heinrich; Noll, Tobias (2015): Integrierte Digitale Schaltungen. Vom Transistor zur optimierten Logikschaltung. Berlin/Heidelberg: Springer.
- König, Lukas; Pfeiffer-Bohnen, Friederike; Schmeck, Hartmut (2016): Theoretische Informatik - ganz praktisch. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg (De Gruyter Studium).
- Korte, Bernhard; Vygen, Jens (2008): Kombinatorische Optimierung. Theorie und Algorithmen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kövari, Lars (2011): Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2010. Print on demand. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek und



- Universitätsbibliothek (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik - Automatisierungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 35).
- Krumke, Sven Oliver; Noltemeier, Hartmut (2009): Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen ; mit 9 Tabellen und 90 Aufgaben. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Kubaschewski, Martin (2016): Ansatz zur dreidimensionalen Layoutplanung bei heterogener Raumgröße. Karlsruhe: Karlsruhe.
- Kudlich, Thomas (2000): Optimierung von Materialflußsystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. München: Technische Universität München.
- Kuhn, Axel; Rabe, Markus (1998): Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- KUKA Systems GmbH (2018): KUKA flexFellow. Online verfügbar unter <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/mobilit%C3%A4t/mobile-roboter/kuka-flexfellow/>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Kurbel, Karl (2003): Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 5., durchges. und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg.
- Kusiak, Andrew; Heragu, Sunderesh S. (1987): The facility layout problem. In: *European Journal of Operational Research* 29 (3), S. 229–251.
- Lauer, Christian (2013): Integriertes Modell zur Materialflusssimulation und zur Visualisierung in der virtuellen Realität. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2013. Als Ms. gedr. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation Techn. Univ (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, 2013,1).
- Law, Averill M. (2007): Simulation modeling and analysis. 4. ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science).
- Law, Averill M.; Kelton, W. David (1991): Simulation modeling and analysis. 2. ed., internat. ed. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill international editions).

- Liebetruth, Thomas (2016): Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Instrumente und Methoden für das Supply Chain Process Management. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Mattern, Friedmann; Mehl, Horst (1989): Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. In: *Informatik-Spektrum* (12), S. 198–210.
- Mayer, Gottfried; Pöge, Carsten (2010): Auf dem Weg zum Standard - Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Gert Zülch und Patricia Stock (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel ; Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010. Karlsruhe: KIT Scientific Publ (ASIM-Mitteilung, AM 131), S. 29–36.
- Meier, Leif Hendrik (2009): Koordination interdependenter Planungssysteme in der Logistik. Einsatz multiagentenbasierter Simulation im Planungsprozess von Container-Terminals im Hafen. Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2008. 1., Aufl. 2008. Wiesbaden: Gabler Verlag /.
- Menzel, Wolfgang (2000): Partizipative Fabrikplanung. Grundlagen und Anwendung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1999. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, 546).
- Merker, Jürgen (1998): Heuristiken in der Layoutplanung. Graphentheoretische Verfahren für das Nachbarschaftsproblem. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Zum Nachbarschaftsproblem in der Layoutplanung, Untersuchung graphentheoretischer Heuristiken, 3).
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Strauch, Jörg (2009): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Murray, Chase C.; Zuo, Xingquan; Smith, Alice E. (2012): An Extended Double Row Layout Problem. In: B. Montreuil, A. Carrano, M.M.R. de Kostner, K. R. Gue, M. Ogle und J. Smith (Hg.): The 12th International Material Handling Research Colloquium. Gardanne, S. 554–569.

- Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther; Abele, Eberhard (Hg.) (2008):  
Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen  
gestalten. Hannover: TEWISS.
- Pawellek, Günther (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen,  
Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg  
(VDI-Buch).
- Prêt, Uwe (2017): Fabrikplanung (Übung) - Schneckengetriebeproduktion. Hg. v.  
Prof. Dr.-Ing. Uwe Prêt. HTW Berlin. Online verfügbar unter  
<http://www.uwe-pret.de/fabrikplanung/skripte/stapel3/getriebe.pdf#page=2&zoom=auto,-158,843>, zuletzt geprüft am 19.08.2018.
- Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und  
Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik.  
Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-  
Buch), zuletzt geprüft am 27.02.2017.
- Robinson, Stewart (2004): Simulation. The practice of model development and  
use. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons  
Ltd.
- Rothe, Jörg (2008): Komplexitätstheorie und Kryptologie. Eine Einführung in  
Kryptokomplexität. Berlin, Heidelberg: Springer (eXamen.press).
- Saatweber, Jutta (2011): Kundenorientierung durch Quality Function  
Deployment. Produkte und Dienstleistungen mit QFD systematisch  
entwickeln. 3., vollst. überarb. Aufl. Düsseldorf: Symposion Publ.
- Sarkar, Angsum; Sarkar, Chandan Kumar; Chanda, Manash; De, Swapnadip  
(2016): Low power VLSI design. Fundamentals. Oldenbourg: DE  
GRUYTER.
- Savsar, Mehmet (1991): Flexible Facility Layout by Simulation. In: *Computers  
& industrial Engineering* 20 (1), S. 155–165.
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried (2004): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb.  
Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin,  
Heidelberg: Springer.

- 
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Schmigalla, Hans (1968): Methoden zur optimalen Maschinenanordnung. Berlin: Verlag Technik.
- Schmigalla, Hans (1995): Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- Schmitz, Markus; Wenzel, Sigrid (2013): Die 3D-Visualisierung in der ereignisdiskreten Simulation – Stellenwert und Entwicklungstendenzen. In: Wilhelm Dangelmaier, Christoph Laroque und Alexander Klaas (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik 2013. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung. 15. ASIM Fachtagung. Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013. Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik; Gesellschaft für Informatik; ASIM-Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik". Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn (ASIM-Mitteilung, 147), S. 373–384.
- Scholz, Daniel (2010): Innerbetriebliche Standortplanung. Das Konzept der Slicing Trees bei der Optimierung von Layoutstrukturen. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Gabler Research).
- Schraft, Rolf Dieter; Bierschenk, Sabine; Kuhlmann, Timm (2003): Prozesskette der integrierte digitalen Planung. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98 (6), S. 316–320.
- Schuh, Günther (2014): Chancen nutzen - Wettbewerbsfähigkeit durch agile Fabrikplanung sichern. In: *wt Werkstattstechnik online* 104 (4), S. 191.
- Shahin, Arash; Poormostafa, Mehdi (2011): Facility Layout Simulation and Optimization. An Integration of Advanced Quality and Decision Making Tools and Techniques. In: *MAS* 5 (4).
- Shariatzadeh, N.; Sivard, G.; Chen, D. (2012): Software Evaluation Criteria for Rapid Factory Layout Planning, Design and Simulation. In: *Procedia CIRP* 3, S. 299–304.

- Shouman; M.A.; Nawara, G. M.; Reyad, A. H.; EL-Darandaly, Kh.: Facility Layout Problem (FLP) and Intelligent Techniques: A Survey. In: 7th International Conference on Production Engineering, Design and Control, PEDAC.
- Siepermann, Christoph; Eley, Michael (Hg.) (2011): Logistik - gestern, heute, morgen. Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres. Unter Mitarbeit von Richard Vahrenkamp. Berlin: GITO-Verl.
- Silcher, Stefan; Groß, Erwin; Siegert, Jörg; Lickefett, Michael; Bauernhansl, Thomas; Mitschang, Bernhard (2015): Mobile Fabriklayoutplanung. In: *Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 96–101.
- SmartFactory KL (2019). Online verfügbar unter <https://smartfactory.de/industrie-4-0-demonstration/>, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Smutkupt, Uttapol; Wimonkasame, Sakapoj (2009): Plant Layout Design with Simulation. In: S. I. Ao (Hg.): International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2009. 18 - 20 March, 2009, Regal Kowloon Hotel, Kowloon, Hong Kong, II. Hong Kong: IAENG (Lecture notes in engineering and computer science), S. 1834–1839.
- Spillner, Andrea (2012): Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2011. Aachen: Shaker (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation, 26, Hg. Uwe Bracht).
- Spur, Günter; Stöferle, Theodor (1994): Fabrikbetrieb. München: Hanser (Handbuch der Fertigungstechnik, 6).
- Srinivas, C.; Ramji, K.; Satyanarayana, B.; Navee, Ravela (2013): Simulations based layout design of large sized multi-row Flexible Manufacturing Systems. In: *Journal of Enineering & Architecture* 1 (1), S. 33–44.
- Startup Factory (2019): Moderne Produktionshallen. Online verfügbar unter <https://www.startupfactory-china.de/start-up-factory/infrastruktur/>.
- Strassburger, Steffen; Schulze, Thomas; Lemessi, Marco; Rehn, Grodon D. (2005): Temporally parallel coupling of discrete simulation systems with virtual reality systems. In: Proceedings of the 2005 Winter Simulation

- Conference. Hilton at the Walt Disney World Resort, Orlando, Florida, U.S.A., Dec 4-7, 2005. New York, N.Y, Piscataway, N.J: Association for Computing Machinery, S. 1949–1957.
- Streim, Hannes (1975): Heuristische Lösungsverfahren - Versuch einer Begriffsklärung. In: *Zeitschrift für Operations Research* 19 (5), S. 143–162.
- Tiedtke, Jürgen R. (Hg.) (2007): Allgemeine BWL. Betriebswirtschaftliches Wissen für kaufmännische Berufe - Schritt für Schritt. 2., überarbeitet Auflage. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- VDI-Richtlinie 3633: Blatt 1 - Simulation von Logistik-, Materialflussund Produktionssystemen Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 11: Simulation von Logistik-, Materialfluss-und Produktionssystemen Simulation und Visualisierung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 4499: Blatt 1 - Digitale Fabrik - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 5200 (2011): Blatt 1. Fabrikplanung - Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Warnecke, H. J.; Dangelmaier, W. (1981): Layoutplanung — der Stand der Technik. In: *OR Spektrum* 3 (1), S. 1–20.
- Wäscher, Gerhard (1982): Innerbetriebliche Standortplanung bei einfacher und mehrfacher Zielsetzung. Wiesbaden: Gabler Verlag (Bochumer Beiträge zur Unternehmensführung und Unternehmensforschung).
- Wenzel, Sigrid; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver; Weiß, Matthias (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Wesebaum, Sören; Mach, Florian (2016): Fabrikbewertung durch mathematische Modellierung. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (3), S. 100–103.

Westkämper, Engelbert (2000): Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung. In: *wt Werkstattstechnik* 90 (3), S. 92–95.

Wiendahl, Hans-Peter; Nofen, Dieter; Klußmann, Jan Hinrich; Breitenbach, Frank (2005): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2010): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 1. Aufl. München: Hanser.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser.

Wirth, Siegfried; Gäse, Thomas; Günther, Uwe (2001): Partizipative simulationsgestützte Layoutplanung. In: *wt Werkstattstechnik* 91 (6), S. 329–332.

Yazici, Hulya Julie (2006): Simulation modeling of a facility layout in operations management classes. In: *Simulation & Gaming* 37 (1), S. 73–87.